Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Graße, Technische Universität Dresden, Lehrstuhl für Stahlbau

# Bemessung von Stahlbrücken (DIN-Fachbericht 103)

## Inhalt

**1 Übersicht**

**2 Werkstoffe**

**3 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit**
3.1 Überblick
3.2 Elastische Spannungsbegrenzung
3.3 Stegblechatmen
3.4 Beschränkungen für das Lichtraumprofil
3.5 Verformungen und Schwingungen von Eisenbahnbrücken
3.6 Verformungen und Schwingungen von Straßenbrücken

**4 Grenzzustände der Tragfähigkeit**
4.1 Grundlagen
4.2 Querschnittsklassen
4.3 Querschnittswiderstände
4.4 Stabilitätsversagen

**5 Verbindungsmittel, Schweißnähte und Anschlüsse**

**6 Werkstoffermüdung**

**7 Ergänzende Reglungen für den Stahlbrückenbau**
7.1 Allgemeines
7.2 Querschnittsnachweise
7.3 Berücksichtigung von Schubverzerrungen
7.4 Plattenbeulen
7.5 Orthotrope Platten

# 1 Übersicht

Der DIN-Fachbericht 103 „Bemessung von Stahlbrücken“ [2] basiert auf dem Eurocode 3 „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten“ Teil 1-1 (DIN V ENV 1993-1-1:1992) „Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau“. Er enthält wesentliche Auszüge aus folgenden Regelwerken:

- Eurocode 3 Teil 2, Stahlbrücken (DIN V ENV 1993-2: 1997)
- Eurocode 3 Teil 1-5, Ergänzende Regeln zu ebenen Blechfeldern ohne Querbelastung (DIN V ENV 1993-1-5:1997)
- Empfehlungen des BMVBW „Ermüdungssicheres Konstruieren von orthotropen Platten für Straßenbrücken“, Stand 2000
- Regelungen der Deutschen Bahn AG zu orthotropen Fahrbahnplatten von Eisenbahnbrücken

In der Regel ist von einer **Nutzungsdauer** einer permanenten Brücke von 100 Jahren auszugehen.
Um die **Dauerhaftigkeit** zu sichern, müssen Brücken unter Berücksichtigung von Verschleiß, Ermüdung und außergewöhnlichen Lasten bemessen oder dagegen geschützt werden.
Bauteile mit geringerer Nutzungsdauer müssen austauschbar sein (Korrosionsschutz; Lager; Seile, Kabel, Hänger; Fahrbahnübergänge, Fahrbahnbeläge usw.).

# 2 Werkstoffe

Für warmgewalzten Baustahl sind in erster Linie DIN EN 10025 und DIN EN 10113 verbindlich.

Die Festigkeitskennwerte Streckgrenze $f_y$ und Zugfestigkeit $f_u$ sind in Tabelle 1 (Klammerwerte beziehen sich auf [2]) angegeben.

| Norm und Stahlgüte | Dicke $t$ [mm] | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $t \leq 40$ mm | | 40 mm $< t \leq 100$ mm | |
| | $f_y$ [N/mm²] | $f_u$ [N/mm²] | $f_y$ [N/mm²] | $f_u$ [N/mm²] |
| DIN EN 10025 | | | | |
| S 235 | 235 | 360 | 215 | 340 |
| S 275 | 275 | 430 | 255 | 410 |
| S 355 | 355 | 510 | 335 | 490 |
| DIN EN 10113 | | | | |
| S 275 N/NL | 275 | 390 | 255 | 370 |
| S 355 N/NL | 355 | 490 | 335 | 470 |
| S 420 N/NL | 420 | 540 | 390 | 520 |
| S 460 N/NL | 460 | 570 | 430 | 550 |
| S 275 M/ML | 275 | 380 | 255[1)] | 360[1)] |
| S 355 M/ML | 355 | 470 | 335[1)] | 450[1)] |
| S 420 M/ML | 420 | 520 | 390[1)] | 500[1)] |
| S 460 M/ML | 460 | 550 | 430[1)] | 530[1)] |
| DIN EN 10137 | | | | |
| S 460 Q/QL/QL1 | 460 | 570 | 440 | 550 |
| DIN EN 10155 | | | | |
| S 235 W | 235 | 360 | 215 | 340 |
| S 355 W | 355 | 510 | 335 | 490 |

[1)] Für Flachstähle: 40 mm $< t \leq$ 63 mm ausschließlich;

Tabelle 1 (3.1a): Charakteristische Werte der Streckgrenze $f_y$ und der Zugfestigkeit $f_u$ für warmgewalzten Baustahl (in Klammer Nummerierung DIN-F. 103)

Für Hohlprofile gelten grundsätzlich die gleichen Festigkeitsklassen mit teilweise etwas veränderten Werten $f_y$ und $f_u$.
Während im Stahlbrückenbau in den ständigen und vorübergehenden Bemessungssituationen die Schnittgrößen elastisch zu ermitteln sind, ist in außergewöhnlichen Bemessungssituationen, z. B. Fahrzeuganprall, eine plastische Ermittlung anwendbar. Dies setzt seitens des Baustahls voraus:

- Verhältnis $f_u/f_y \geq 1{,}20$ (Arbeitsvermögen)
- Bruchdehnung $\varepsilon_u$ ($A_5$) $\geq 15$ %
- Bruchdehnung $\varepsilon_u \geq 15 \cdot \varepsilon_y$ (Fließdehnung)

Die Werkstoffgütewahl bezüglich Sprödbruchsicherheit ist in der DASt-Richtlinie 009 geregelt. Für Straßenbrücken ist jedoch kein spezieller Nachweis erforderlich, wenn die

Blechdicken nach Tabelle 2 nicht überschritten werden. Im Regelfall ist von einer Einsatztemperatur von $-30^0$ C auszugehen.

| Stahlgüte nach DIN EN | | | | U= 0° | -10 °C | -20 °C | -30 °C | -40 °C | -50 °C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10025 | 10113[1)] | 10137[2)] | 10155[1)] | [mm] | | | | | |
| S235J0 | | | S235J0W | 100 | 85 | 75 | 60 | 55 | 45 |
| S235J2 | | | S235J2W | 140 | 120 | 100 | 85 | 75 | 60 |
| S275J0 | | | | 90 | 80 | 65 | 55 | 50 | 40 |
| S275J2 | | | | 130 | 110 | 90 | 80 | 65 | 55 |
| | S275-N/M | | | 150 | 130 | 110 | 90 | 80 | 65 |
| | S275NL/ML | | | 200 | 170 | 150 | 130 | 110 | 90 |
| S355J0 | | | S355J0W | 80 | 65 | 55 | 45 | 40 | 30 |
| S355J2 | | | S355J2W | 110 | 90 | 80 | 65 | 55 | 45 |
| S355K2 | | | S355K2W | 130 | 110 | 90 | 80 | 65 | 55 |
| | S355N/M | | | 130 | 110 | 90 | 80 | 65 | 55 |
| | S355NL/ML | | | 175 | 150 | 130 | 110 | 90 | 80 |
| | S420N/M | | | 115 | 95 | 80 | 70 | 55 | 45 |
| | S420NL/ML | | | 155 | 135 | 115 | 95 | 80 | 70 |
| | S460N/M | | | 105 | 90 | 75 | 60 | 50 | 40 |
| | S460NL/ML | | | 150 | 125 | 105 | 90 | 75 | 60 |
| | | S460Q | | 90 | 75 | 60 | 50 | 40 | 35 |
| | | S460QL | | 125 | 105 | 90 | 75 | 60 | 50 |
| | | S460QL1 | | 170 | 150 | 125 | 105 | 90 | 75 |

1) Die in DIN EN 10113 angegebenen Grenzdicken für Stahlbauteile sind in Teil 2 ("N"-Güten) und für Langprodukte in Teil 3 ("M"-Güten) geregelt. Bei Flachstählen der "M"-Güte ist die maximale Dicke auf 63 mm begrenzt.

2) Für die in DIN EN 10155 angegebenen Stähle ist die maximale Dicke auf 100 mm begrenzt.

Tabelle 2 (3.2.a): Sprödbruchsicherheit. Maximale Blechdicken für Straßenbrücken (außer Hohlprofile)

Für Eisenbahnbrücken mit ihrer höheren dynamischen Belastung gelten die schärferen Bedingungen nach Tabelle 3.

| Norm | Sorte/Güte mit Aufschweiß-biegeversuch[1] | Zulässige Werkstoffdicke [mm] | |
|---|---|---|---|
| | | Nicht geschweißte Bauteile, oder geschweißt im Druckbereich | Im Zugbereich geschweißte Bauteile |
| DIN EN 10025 | S235JRG1 | 25[2] | --- |
| | S235JRG2 | 35 | 20 |
| | S235J0 | 50 | 35 |
| | S235J2G3 | >60[3] | 60 |
| | S355JR | 20 | --- |
| | S355J0 | 40 | 10 |
| | S355J2G3 | 60 | 35 |
| | S344K2G3 **S355K2G3** | >60[3] | 60 |
| DIN EN 10113 Teil 2 | S355N | >60[3] | 60 |
| | S355NL | >60[3] | >60[3] |

[1] Forderung des Aufschweißbiegeversuches ab Dicken von 30mm. (Näheres siehe BN 918002)
[2] Nur für nichtgeschweißte Bauteile zulässig. Nur in Dicken ≤ 25 mm lieferbar.
[3] Dicken > 60 mm sind nur mit Zustimmung im Einzelfall erlaubt.

Tabelle 3 (3.2b): Sprödbruchsicherheit. Maximale Blechdicken für Eisenbahnbrücken

Für Schrauben im Brückenbau sind nur die Festigkeitsklassen der Tabelle 4 zugelassen. Bei Verwendung verzinkter Schrauben sind nur komplette Garnituren eines Herstellers einzusetzen.

| Festigkeitsklasse der Schraube | 4.6 | 5.6 | 8.8 | 10.9 |
|---|---|---|---|---|
| $f_{yb}$ (N/mm²) | 240 | 300 | 640 | 900 |
| $f_{ub}$ (N/mm²) | 400 | 500 | 800 | 1000 |

Tabelle 4 (3.3a): Charakteristische Werte der Streckgrenze $f_{yb}$ und der Zugfestigkeit $f_{ub}$ für Schrauben

Schweißzusatzwerkstoffe dürfen nur verwendet werden, wenn sie den Rahmenbedingungen für den bauaufsichtlichen Bereich entsprechen. Die für das Schweißgut festgelegten Werte der Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Mindestkerbschlagarbeit müssen mindestens den Werten für das verschweißte Grundmaterial entsprechen.

Für die Berechnung der Hertzschen Grenzpressung von Stahllagern mit maximal zwei Rollen sind die charakteristischen Werte $\sigma_H$ in Tabelle 5 angegeben.

| | Werkstoff | $\sigma_{H,K}$ [N/mm²] |
|---|---|---|
| 1 | S 235 | 800 |
| 2 | S 355, GS-52 | 1000 |
| 3 | C 35 N | 950 |

Tabelle 5 (R 3): Charakteristische Werte $\sigma_H$ der Grenzpressung nach Hertz für Lager mit ≤ 2 Rollen

# 3 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

## 3.1 Überblick

Von einer Brücke muss verlangt werden, dass neben den Grenzzuständen der Tragfähigkeit auch die relevanten Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit eingehalten werden.

Hierzu sind folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Einhaltung elastischer Dehnungen im Gebrauchszustand (u. a. zur Vermeidung bleibender Verformungen)

- Begrenzung von Verformungen
  (u. a. zur Einhaltung von Lichtraumprofilen, zur Begrenzung dynamischer Effekte, zur Vermeidung von Rissen in Fahrbahnbelägen)

- Abstimmung der Eigenfrequenzen
  (u. a. zur Vermeidung von Schwingungen infolge Verkehr oder Wind, die zu Materialermüdung, Geräuschemission und Beeinträchtigung des Fahrkomforts führen können)

- Beschränkung von Plattenschlankheiten
  (u. a. zur Vermeidung der Wellenbildung von Blechen, der Stegblechatmung (Ermüdung) und des Steifigkeitsverlusts durch Ausbeulen)

- Sicherung ausreichender Dauerhaftigkeit durch entsprechende Detailausbildung zur Reduzierung von Korrosion und Verschleiß

- Durchführbarkeit von Wartungs- und Reparaturarbeiten (u. a. Zugänglichkeit für Inspektionen, Wartungs- und Reparaturarbeiten, Austauschbarkeit von Lagern, Fahrbahnübergängen usw.)

## 3.2 Elastische Spannungsbegrenzung

Bei der im Brückenbau vor allem wegen der Ermüdungsproblematik üblichen elastischen Schnittkraftermittlung ohne Nutzung plastischer Querschnitts- und Systemreserven im Grenzzustand der Tragfähigkeit (auch wenn die Querschnittsklassen 1 und 2 vorliegen) sind die Spannungen unter Gebrauchslasten (d. h. ohne Lastfaktoren) im elastischen Bereich. Es kann daher wohl immer auf einen derartigen Nachweis (bei dem $\gamma_{M,ser} = 1{,}0$ ist) verzichtet werden.

## 3.3 Stegblechatmen

In der Regel sollte im GZT ein Beulnachweis nach DIN 18800 T.3 geführt werden. Dann ist ausgeschlossen, dass es unter Gebrauchslasten zu begrenzten Beulerscheinungen der Stegbleche (Atmen) kommt. Dieses kann zu Ermüdungsschäden an den Steg-Flansch-Verbindungen führen.

Ein spezieller Nachweis kann auch entfallen, wenn die Stegschlankheit auf b/t $\leq$ 150 (bei Eisenbahnbrücken b/t $\leq$ 130) begrenzt wird.
Sonst ist nachzuweisen

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed,ser}}{k_\sigma \cdot \sigma_E}\right)^2 + \left(1{,}1\frac{\tau_{Ed,ser}}{k_\tau \cdot \sigma_E}\right)^2} \leq 1{,}15$$

mit $\sigma_E = \frac{\pi^2 E}{12\left(1-\nu^2\right)}\left(\frac{t}{b}\right)^2 = 189800\left(\frac{t}{b}\right)^2$ [N/mm²]

t = Stegblechdicke
b = Stegblechhöhe

Hierbei sind $\sigma_{x,Ed,ser}$ und $\tau_{Ed,ser}$ die Spannungen unter der häufigen Kombination. Wenn sie über die Beulfeldlänge a (Abb. 1) veränderlich sind, ist der Wert im Abstand $\text{Min}\begin{Bmatrix} a/2 \\ b/2 \end{Bmatrix}$ vom höher belasteten Querrand einzusetzen, mindestens aber die Hälfte des Größtwerts über die Beulfeldlänge a; $k_\sigma$ und $k_\tau$ sind die üblichen Beulwerte.

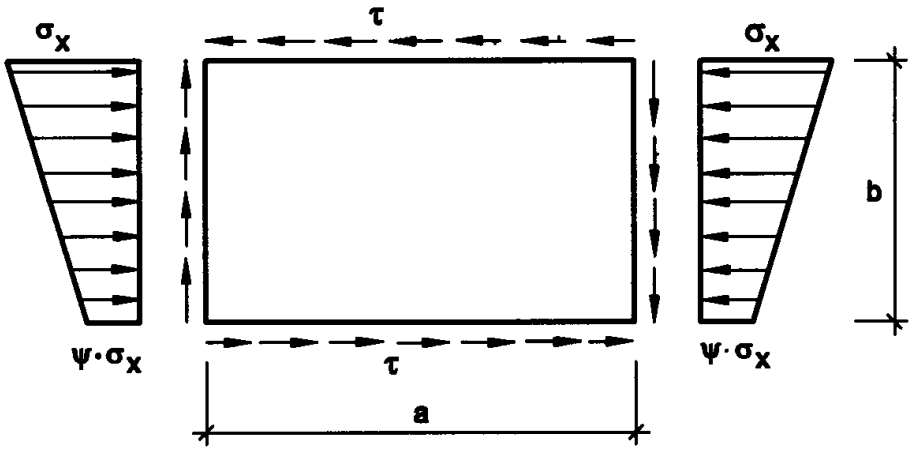



Abb. 1: Beulfeld mit Normalspannungen $\sigma_x$ und Schubspannungen $\tau$

### 3.4 Beschränkungen für das Lichtraumprofil

Lichtraumprofile müssen unter Berücksichtigung der Verformungen freigehalten werden, die unter der seltenen Lastkombination zu berechnen sind. Bei Überhöhungen aus optischen Gründen ist ggf. Schlupf der Schraubenverbindungen zu beachten.

### 3.5 Verformungen und Schwingungen von Eisenbahnbrücken

Die diesbezüglich im DIN-Fachbericht 101 [1], speziell im Anhang G, festgelegten Kriterien werden unter [3] 8.4, Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit, behandelt.

### 3.6 Verformungen und Schwingungen von Straßenbrücken

Konkrete Durchbiegungsbegrenzungen für Straßenbrücken sind im DIN-Fachbericht 103 nicht enthalten. Sie sollten ggf. in den Ausschreibungsunterlagen festgelegt werden, wenn übermäßige Verformungen das dynamischen Verhalten der Brücke oder den Nutzerkomfort ungünstig beeinflussen. Dann sind sie mit der häufigen Lastkombination (im Gegensatz zu 3.4) zu berechnen.

Die von der DIN 18809 her bekannte Regelung über die Mindeststeifigkeit von Längsrippen, um Risse in Asphaltbelägen auf Stahlfahrbahnen zu vermeiden, wurde beibehalten (Abb. 2).

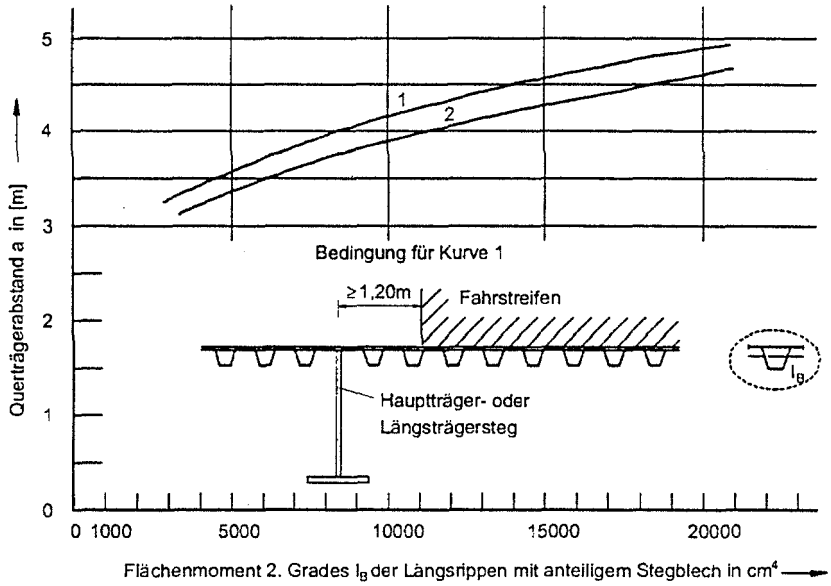



Abb. 2 (4.2): Mindeststeifigkeit von Längsrippen

# 4 Grenzzustände der Tragfähigkeit

## 4.1 Grundlagen

Bei Stahlbrücken müssen die Nachweise gegen folgende **Grenzzustände der Tragfähigkeit** (GZT) erfüllt sein

- Querschnittsbeanspruchbarkeit (auf Zug, Druck, Biegung Querkraft, Stegquerbelastung und Interaktion dieser Beanspruchungen, ggf. auch in Nettoquerschnitten)
- Bauteilbeanspruchbarkeit (Knicken, Biegedrillknicken, Schubbeulen)
- Beanspruchbarkeit der Verbindungen
- Lagesicherheit

Der Grenzzustand der Ermüdung wird unter 6 gesondert betrachtet.

Die **Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_M$** in den GZT sind wie folgt festgelegt:

$\gamma_{M0} = 1{,}00$ bei reinen Festigkeitsnachweisen gegen Fließen (ohne Stabilitätsgefährdung)

$\gamma_{M1} = 1{,}10$ bei Stabilitätsproblemen und Festigkeitsnachweisen der Querschnittsklasse 4

$\gamma_{M2} = 1{,}25$ bei Festigkeitsnachweisen gegen die Zug-(Bruch-)-Festigkeit

Zur **Schnittgrößenermittlung** statisch unbestimmter Tragwerke ist festgelegt, dass sie generell elastisch zu erfolgen hat. Eine plastische Ermittlung ist nur bei Querschnitten der Klasse 1 in außergewöhnlichen Bemessungssituationen zulässig. Hierbei muss der Werkstoff die unter 2 genannten Anforderungen an das Arbeitsvermögen erfüllen und die Fließfähigkeit im Bereich der plastischen Gelenke muss auch konstruktiv gesichert sein (z. B. keine Stirnplattenverbindungen).

Bezüglich spezieller **Tragsysteme** ist festgelegt, dass bei **orthotropen Platten** die Spannungen aus der Fahrbahn- und der Haupttragwirkung (Membranspannungen genannt) zu überlagern sind und dass die Querträgerspannungen unter Berücksichtigung der Ausschnitte für die Längsrippen zu berechnen sind, z. B. mit einem Vierendeelträger-Modell.

Plattenbiegespannungen brauchen in der Regel nicht berücksichtigt zu werden. Dies gilt bei $t_{Dbl} \geq 12$ mm; $t_R \geq 6$ mm; $a/t_{Dbl} \leq 25$; $h \leq 300$ mm, s. Abb. 3.

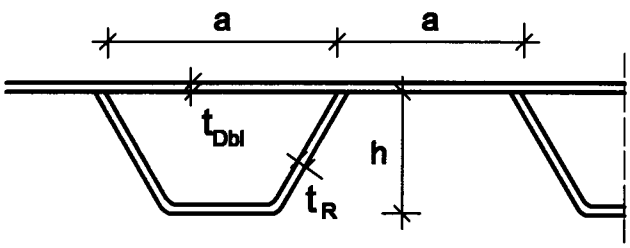



Abb. 3: Abmessungen der orthotropen Platte

**Imperfektionen** sind zu berücksichtigen bei

- der Schnittgrößenermittlung
- dem Nachweis von Aussteifungen
- der Bemessung von Bauteilen

Bei der **Schnittgrößenermittlung** nach Theorie II. Ordnung sind die Imperfektionen immer zu berücksichtigen. Ihre Form kann - soweit sie nicht vom System her festliegt - affin zu derjenigen Eigenform angenommen werden, die zur niedrigsten Verzweigungslast führt. Wenn $\gamma_u/\gamma_{crit}$ das Verhältnis der Belastungen ist, die zur Erschöpfung des Querschnittswiderstands (ohne Stabilität) bzw. zum Erreichen der elastischen Knicklast führen (beim einfachen Druckstab $N_{pl}/N_{crit}$), ist $\bar{\lambda} = \sqrt{\gamma_u / \gamma_{crit}}$ .

Damit kann dann auch die maximale Amplitude $e_{od}$ bestimmt werden:

$$e_{od} = \alpha \cdot \left(\bar{\lambda} - 0{,}2\right) \cdot \frac{W_{el}}{A} \cdot \frac{1 - \chi \bar{\lambda}^2 \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}}}{1 - \chi \bar{\lambda}^2}$$

mit $\alpha$ bzw. $\chi$ Imperfektionsbeiwert bzw. Abminderungsfaktor für die maßgebende Knickspannungslinie (s. 4.4.1), die im wesentlichen wie in DIN 18800 T.2 (1990) definiert ist.
Bei der Berechnung von **Aussteifungssystemen** zur Sicherung der seitlichen Stabilität von Trägern oder Druckgliedern ist für diese eine bogenförmige Anfangsimperfektion $e_0$ anzusetzen (Abb. 4).

$e_0 = k_n L / 500$
mit $k_n = \frac{1}{\sqrt{n}}$

L = Spannweite des auszusteifenden Bauteils
n = Anzahl der auszusteifenden Bauteile

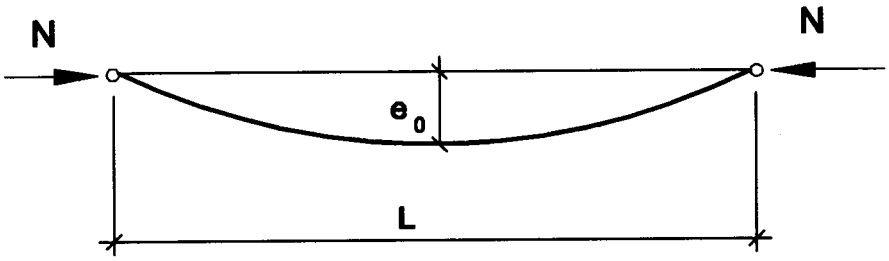



Abb. 4: Bogenförmige Anfangsimperfektion

Bei Annahme einer Parabel ist die Krümmung $\frac{8 \cdot e_0}{L^2}$ und die Abtriebskraft (nur aus $e_0$, d. h. ohne Zunahme unter der Belastung) $N \cdot \frac{8e_0}{L^2} [kN/m]$.
An Stößen von Trägern oder Druckgliedern sollte ein gedachter Knick von $2\Phi = 2 \cdot \frac{1}{200} k_n = \frac{1}{100} k_n$ und damit eine Abtriebskraft von $\frac{N}{100} \cdot k_n$ angenommen werden, siehe Abb. 5.

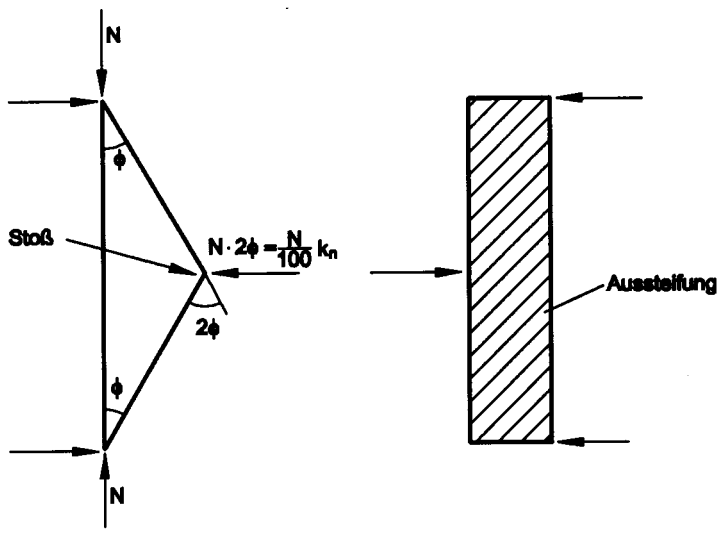



Abb. 5 (5.2): Kräfte auf das Aussteifungssystem bei Trägerstößen

Wirken auf das Aussteifungssystem weitere (äußere) Kräfte, z. B. Windkräfte auf einen Windverband, so sind sie bei der Berechnung zu berücksichtigen.

## 4.2 Querschnittsklassen

Die folgenden vier Querschnittsklassen werden unterschieden:

- Klasse 1: „Plastische Querschnitte“ können ohne Beulerscheinungen eine Vollplastizierung des Querschnitts aufnehmen und haben dabei ein ausreichendes Rotationsvermögen für plastische Schnittgrößenumlagerungen.

- Klasse 2: „Kompakte Querschnitte“ haben ebenfalls eine vollplastische Querschnittstragfähigkeit, dies aber bei begrenztem Rotationsvermögen

- Klasse 3: „Halb-kompakte Querschnitte“ erreichen die Streckgrenze in der ungünstigsten Randfaser ohne Ausbeulen. Die Ausnutzung plastischer Querschnittsreserven würde aber zum Ausbeulen führen.

- Klasse 4: „Schlanke Querschnitte“ beulen bereits vor Erreichen der Streckgrenze in der ungünstigsten Randfaser aus. Ihr Widerstand gegen Druck und/oder Biegung muss daher unter Abzug ausgebeulter Querschnittsteile, d. h. mit effektiven Querschnitten, bestimmt werden.

Die Momenten-Rotations-(M-Θ-) Charakteristiken und die Spannungsverteilungen sind in Abb. 6 dargestellt.

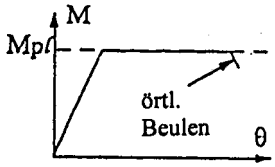
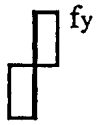
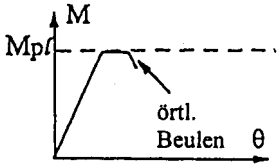
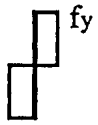
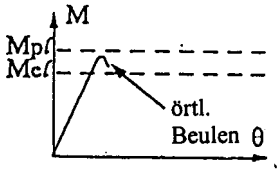
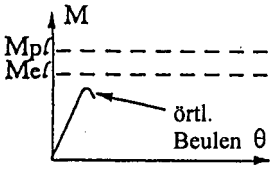
| Querschnitts-klasse | M - Θ - Verlauf | Grenzspannungsverteilung |
|---|---|---|
| 1 |  |  |
| 2 |  |  |
| 3 |  | |
| 4 |  | |

Abb. 6: Momenten-Rotations-(M-Θ-)-Diagramme und Grenz-Spannungsverteilungen der Querschnittsklassen 1 bis 4

**Im Brückenbau müssen ausgesteifte Querschnitte der Klasse 3, bei denen die Einzelfelder die Bedingungen der Klasse 1 oder 2 erfüllen, nach Klasse 3 behandelt werden, d. h. sie können nur elastisch ausgenutzt werden ([2], 5.1.3 (2)).**

Eine Ausnahme bilden außergewöhnliche Bemessungssituationen.

Für verschiedene druck- oder biegedruckbeanspruchte Querschnittsteile, z. B. Steg oder Gurt, kann sich eine unterschiedliche Klasse ergeben. **In der Regel ist der Gesamtquerschnitt in die ungünstigste Klasse einzustufen.** Die Einstufung der Querschnittsteile erfolgt nach Tabelle 6.

Wenn ein druckbeanspruchtes Teil nicht die Bedingungen der Klasse 3 erfüllt, ist es in Klasse 4 einzuordnen.

**Druckbeanspruchte Bauteile mit Längssteifen sind grundsätzlich in die Klasse 4 einzustufen. Sie können jedoch in die Klasse 3 hochgestuft werden, wenn der Beulnachweis nach DIN 18800 T.3 erbracht wird, s. [2], 5.3.5.1 (2).**

Damit **Längssteifen** ihre aussteifende Wirkung nicht durch örtliches Beulen verlieren, müssen sie ein Verhältnis b/t ≤ 12,5 ε, s. Abb. 7, haben.

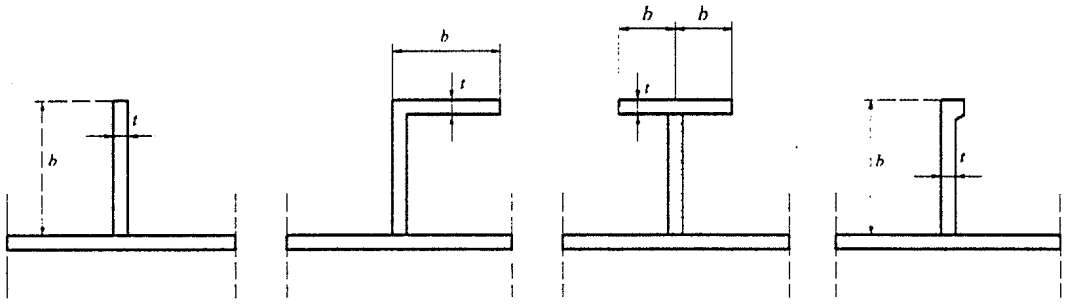



Abb. 7 (5.4) b/t-Verhältnis für Längssteifen $\frac{b}{t} \leq 12{,}5 \cdot \varepsilon \qquad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

## 4.3 Querschnittswiderstände

### 4.3.1 *Vorbemerkung*

Bei den anzusetzenden Bauteilbreiten, s. Tabelle 6, ist ggf. die Schubverzerrung (mitwirkende Breite) nach 7.3 zu berücksichtigen.

Die Ermittlung effektiver Breiten infolge örtlichen Ausbeulens für die Querschnittsklasse 4 wird im Abschnitt 7.4 behandelt.

### 4.3.2 *Zug*

In jedem Querschnitt darf die (äußere) Bemessungszugkraft $N_{Sd}$ die Grenzzugkraft $N_{t,Rd}$ nicht überschreiten.

$N_{Sd} \leq N_{t,Rd}$

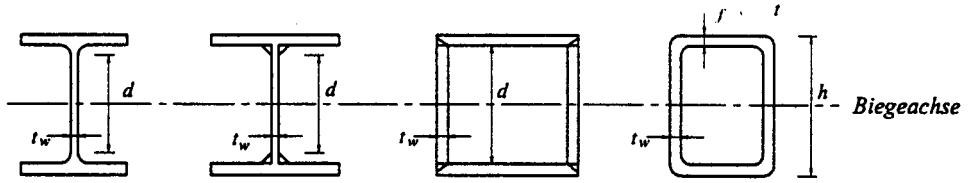
Dabei gilt

$$N_{t,Rd} = \mathrm{Min}\begin{cases} N_{pl,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0} \\ N_{u,Rd} = 0{,}9 \cdot A_{net} \cdot f_u / \gamma_{M2} \end{cases}$$

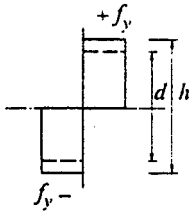
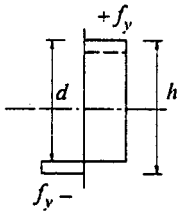
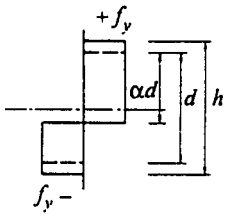
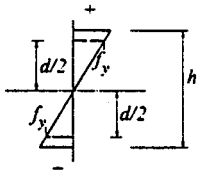
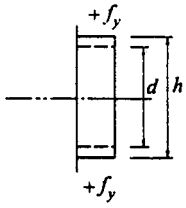
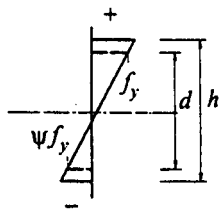
Bei gleitfesten Verbindungen der Kategorie C (gleitfest im GZT) ist die Grenzzugkraft

$$N_{net,Rd} = A_{net} \cdot f_y / \gamma_{M0}$$

(a) Stegblechteile: (beidseitig gestützte Teile rechtwinklig zur Biegeachse)



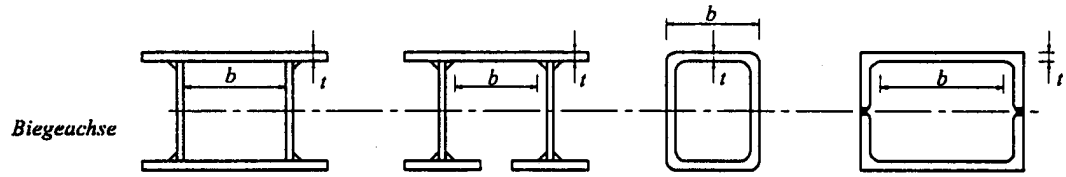

d = h - 3t [t = $t_f$ = $t_w$]

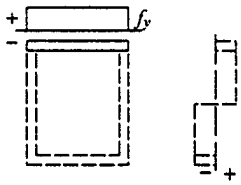
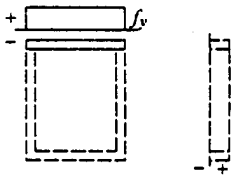
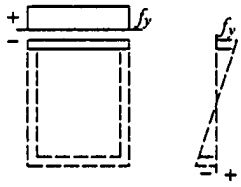
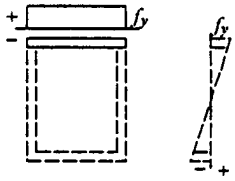
| Klasse | Stegblech beansprucht auf Biegung | Stegblech beansprucht auf Druck | Stegblech beansprucht auf Biegung und Druck |
|---|---|---|---|
| Spannungsverteilung über Querschnittsteil (Druck positiv) |  |  |  |
| 1 | $d/t_w \leq 72\varepsilon$ | $d/t_w \leq 33\varepsilon$ | für $\alpha > 0{,}5$: $d/t_w \leq 396\,\varepsilon/(13\alpha-1)$ für $\alpha < 0{,}5$: $d/t_w \leq 36\varepsilon/\alpha$ |
| 2 | $d/t_w \leq 83\varepsilon$ | $d/t_w \leq 38\varepsilon$ | für $\alpha > 0{,}5$: $d/t_w \leq 456\varepsilon/(13\alpha-1)$ für $\alpha > 0{,}5$: $d/t_w \leq 41{,}5\varepsilon/\alpha$ |
| Spannungsverteilung über Querschnittsteil (Druck positiv) |  |  |  |
| 3 | $d/t_w \leq 124\varepsilon$ | $d/t_w \leq 42\varepsilon$ | für $\psi > -1$: $d/t_w \leq 42\varepsilon/(0{,}67 + 0{,}33\psi)$ für $\psi \leq -1$: $d/t_w \leq 62\varepsilon(1-\psi)(-\psi)^{0.5}$ |

| $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ | $f_y$ | 235 | 275 | 355 |
|---|---|---|---|---|
| | $\varepsilon$ | 1 | 0,92 | 0,81 |

Tabelle 6 (5.3.1): Maximale (b/t)-Verhältnisse für druckbeanspruchte Querschnitte (Blatt 1)

(b) Flanschteile (Beidseitig gestützte Teile parallel zur Biegeachse)

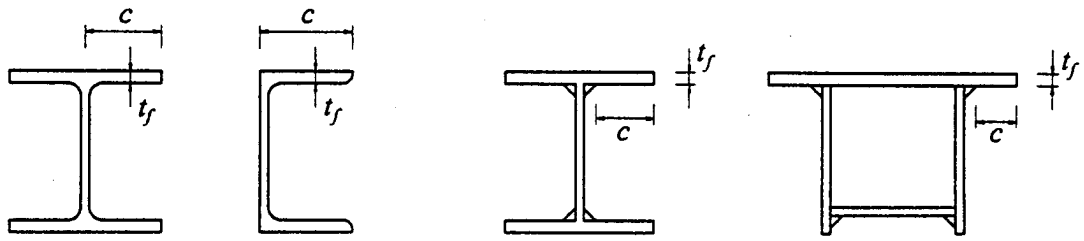



| Klasse | Querschnittsform | Querschnitt beansprucht auf Biegung | Querschnitt beansprucht auf Druck |
|---|---|---|---|
| Spannungsverteilung über Querschnittsteil und Querschnitt (Druck positiv) | |  |  |
| 1 | gewalzte Hohlprofile<br>andere | $(b - 3t_f)/t_f \leq 33\varepsilon$<br>$b/t_f \leq 33\varepsilon$ | $(b - 3t_f)/t_f \leq 42\varepsilon$<br>$b/t_f \leq 42\varepsilon$ |
| 2 | gewalzte Hohlprofile<br>andere | $(b - 3t_f)/t_f \leq 38\varepsilon$<br>$b/t_f \leq 38\varepsilon$ | $(b - 3t_f)/t_f \leq 42\varepsilon$<br>$b/t_f \leq 42\varepsilon$ |
| Spannungsverteilung über Querschnittsteil und Querschnitt (Druck positiv) | |  |  |
| 3 | gewalzte Hohlprofile<br>andere | $(b - 3t_f)/t_f \leq 42\varepsilon$<br>$b/t_f \leq 42\varepsilon$ | $(b - 3t_f)/t_f \leq 42\varepsilon$<br>$b/t_f \leq 42\varepsilon$ |

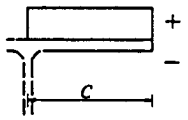
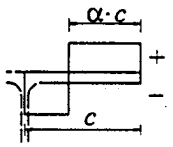
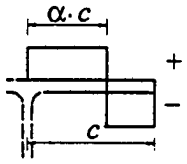
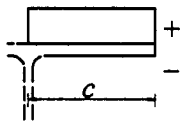
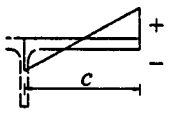
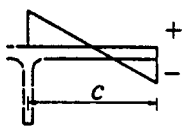
| $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ | $f_y$ | 235 | 275 | 355 |
|---|---|---|---|---|
| | $\varepsilon$ | 1 | 0,92 | 0,81 |

Tabelle 6 (5.3.1): Maximale (b/t)-Verhältnisse für druckbeanspruchte Querschnitte (Blatt 2)

(c) Flanschteile (einseitig gestütze Teile)




Gewalzte Querschnitte — Geschweißte Querschnitte

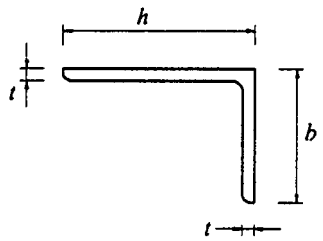
| Klasse | Querschnittsform | Flansch beansprucht auf Druck | Flansch beansprucht auf Druck und Biegung: Flanschende in Druckbereich | Flansch beansprucht auf Druck und Biegung: Flanschende in Zugbereich |
|---|---|---|---|---|
| Spannungsverteilung über Querschnittsteil und Querschnitt (Druck positiv) | |  |  |  |
| 1 | gewalzt<br>geschweißt | $c/t_f \le 10\varepsilon$<br>$c/t_f \le 9\varepsilon$ | $c/t_f \le 10\varepsilon/\alpha$<br>$c/t_f \le 9\varepsilon/\alpha$ | $c/t_f \le 10\varepsilon/(\alpha^{1,5})$<br>$c/t_f \le 9\varepsilon/(\alpha^{1,5})$ |
| 2 | gewalzt<br>geschweißt | $c/t_f \le 11\varepsilon$<br>$c/t_f \le 10\varepsilon$ | $c/t_f \le 11\varepsilon/\alpha$<br>$c/t_f \le 10\varepsilon/\alpha$ | $c/t_f \le 11\varepsilon/(\alpha^{1,5})$<br>$c/t_f \le 10\varepsilon/(\alpha^{1,5})$ |
| Spannungsverteilung über Querschnittsteil und Querschnitt (Druck positiv) | |  |  |  |
| 3 | gewalzt<br>geschweißt | $c/t_f \le 15\varepsilon$<br>$c/t_f \le 14\varepsilon$ | $c/t_f \le 23\varepsilon\, k_\sigma^{0,5}$<br>$c/t_f \le 21\varepsilon\, k_\sigma^{0,5}$<br>$k_\sigma$ siehe Kapitel III Tabelle 4.2 | |

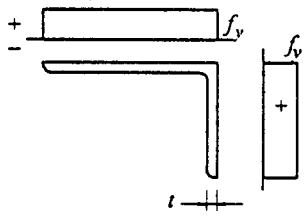
| $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ | $f_y$ | 235 | 275 | 355 |
|---|---|---|---|---|
| | $\varepsilon$ | 1 | 0,92 | 0,81 |

Tabelle 6 (5.3.1): Maximale (b/t)-Verhältnisse für druckbeanspruchte Querschnitte (Blatt 3)

(d) **Winkel**
siehe auch (c)
Einseitig gestützte Flanschteile (Blatt 3)

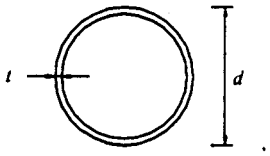
(gilt nicht für Winkel mit kontinuierlicher Verbindung zu anderen Bauteilen)




| Klasse | Querschnitte auf Druck beansprucht |
|---|---|
| Spannungsverteilung über den Querschnitt (Druck positiv) |  |
| 3 | $h/t \leq 15\varepsilon$ : $(b + h)/(2t) \leq 11{,}5\varepsilon$ |



(e) **Rohrquerschnitte**




| Klasse | Querschnitt auf Biegung oder/und Druck beansprucht |
|---|---|
| 1 | $d/t \leq 50\varepsilon^2$ |
| 2 | $d/t \leq 70\varepsilon^2$ |
| 3 | $d/t \leq 90\varepsilon^2$ |

| $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ | $f_y$ | 235 | 275 | 355 |
|---|---|---|---|---|
| | $\varepsilon$ | 1 | 0,92 | 0,81 |
| | $\varepsilon^2$ | 1 | 0,85 | 0,66 |

Tabelle 6 (5.3.1): Maximale (b/t)-Verhältnisse für druckbeanspruchte Querschnitte (Blatt 4)

### 4.3.3 *Druck*

Für druckbeanspruchte Querschnitte muss gelten

$N_{Sd} \leq N_{c,Rd}$

mit

$N_{c,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0}$ in den Querschnittsklassen 1 bis 3

$N_{c.Rd} = A_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M1}$ in der Querschnittsklasse 4

Es ist zu beachten, dass sich in der Klasse 4 durch örtliches Beulen der Schwerpunkt des Querschnitts verschieben kann und damit Zusatzmomente zu berücksichtigen sind (s.7.2). Außerdem ist bei druckbeanspruchten Bauteilen zusätzlich immer der Stabilitätsnachweis (s.4.4) zu führen.

### 4.3.4 *Biegung*

Hier muss bei einachsiger Biegung gelten

$M_{Sd} \leq M_{c,Rd}$

mit

$M_{c,Rd} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0}$ bei den Querschnittsklassen 1 und 2
$= W_{el} \cdot f_y / \gamma_{M0}$ in der Klasse 3
$= W_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M1}$ in der Klasse 4

Schraubenlöcher brauchen nur im Zugflansch abgezogen zu werden. Dieser ist wie ein Zugstab zu betrachten. Damit ist bei $N_{u,Rd} \geq N_{pl,Rd}$ kein Lochabzug erforderlich.
Bei zweiachsiger Biegung sind die Interaktionsformeln unter 3.4.3.7 anzuwenden.

### 4.3.5 *Querkraft*

Unter der Voraussetzung, dass Schubbeulen nicht maßgebend wird (s. 3.7.4.3), muss gelten

$V_{Sd} \leq V_{pl,Rd}$

mit

$V_{pl,Rd} = A_v \left( f_y / \sqrt{3} \right) / \gamma_{M0}$

Die Schubfläche $A_v$ ist in [2] 5.4.6 detailliert festgelegt. Vereinfacht kann man $A_v$ als die Summe der Teilflächen bezeichnen, die in Richtung der Querkraft liegen. Für gewalzte I-, H- oder C-Profile darf bei Lastrichtung in Stegebene gesetzt werden

$A_v = 1{,}04\ h \cdot t_w$ (h = Gesamthöhe, $t_w$ = Stegdicke).

### 4.3.6 *Biegung und Querkraft*

Das Grenzmoment $M_{c,Rd}$ kann durch die Querkraft abgemindert werden. Dies ist aufgrund der Wiederverfestigung des Werkstoffs erst bei $V_{Sd} > 0{,}5\ V_{pl,Rd}$ der Fall.
In diesem Fall ist für die Schubfläche $A_v$ mit einer auf $(1-\rho)f_y$ reduzierten Streckgrenze zu rechnen.

Es gilt

$\rho = (2\ V_{Sd}/V_{pl,Rd} - 1)^2$

Für Querschnitte mit gleichen Flanschen und Biegung um die Hauptachse gilt damit

$$M_{V,Rd} = \left( W_{pl} - \frac{\rho \cdot A_v^{\ 2}}{4 \cdot t_w} \right) f_y / \gamma_{M0} \leq M_{c,Rd}\,.$$

### 4.3.7 *Biegung und Normalkraft*

Bei Querschnitten der Klassen 1 und 2 ist das durch N abgeminderte Grenzmoment $M_{N,Rd}$ durch Annahme einer Spannungsverteilung bestimmbar, die mit den Schnittgrößen im Gleichgewicht steht und nirgends die Fließgrenze überschreitet, vorausgesetzt, dass diese Spannungsverteilung bei Betrachtung der zugehörigen plastischen Verformungen möglich ist.

Am Rechteckquerschnitt, z. B. einem einzelnen Blech, ist diese Betrachtung einfach. Wenn man in der Spannungsverteilung der Abb. 8 die horizontal schraffierten (gleich großen) Spannungskörper dem Moment, die vertikal schraffierten der Normalkraft zuordnet, gilt für N und M

$N = f_{y,d} \cdot 2\ z_0 \cdot t$

$$M = f_{y,d} \cdot t \left( \frac{b}{2} - z_0 \right) \cdot \left( \frac{b}{2} + z_0 \right) = f_{y,d} \cdot t \left( \frac{b^2}{4} - z_0^{\ 2} \right)$$

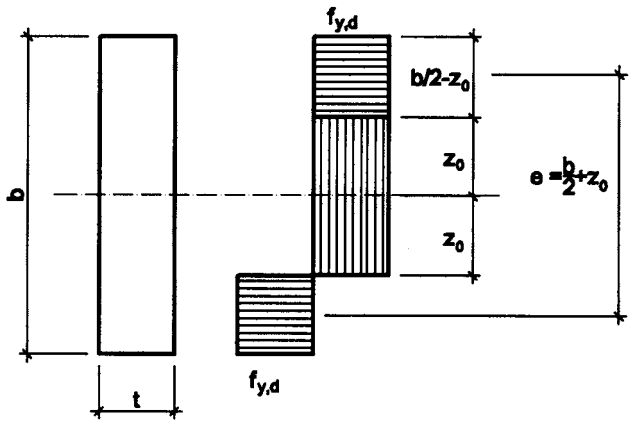



Abb. 8: Plastische M-N-Interaktion

Mit $z_0 = \frac{N}{2 f_{y,d} t}$

wird

$$M = f_{y,d} t \left( \frac{b^2}{4} - \frac{N^2}{4 f_{y,d}{}^2 t^2} \right)$$

Teilt man diese Gleichung durch $M_{pl.Rd} = f_{y,d} \cdot W_{pl} = f_{y,d} \cdot \frac{t \cdot b^2}{4}$,
so folgt

$$\frac{M}{M_{pl,Rd}} = 1 - \frac{N^2 \quad 4}{4 f_{y,d} \cdot t \left( f_{y,d} t \cdot b^2 \right)} = 1 - \frac{N^2}{\left( f_{y,d} t \cdot b \right)^2}$$

Da gilt

$N_{pl,Rd} = A \cdot f_{y,d} = f_{y,d} \cdot t \cdot b$

folgt

$$\frac{M}{M_{pl,Rd}} = 1 - \left( \frac{N}{N_{pl,Rd}} \right)^2$$

und damit die Nachweisgleichung

$$\frac{M_{Sd}}{M_{pl,Rd}} + \left(\frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}}\right)^2 \leq 1$$

Ähnliche Überlegungen gelten für andere Profile, z. B. mit Flanschen. Hier wird eine gewisse Zugbeanspruchung des Stegs (i. d. Regel 50 % der Steg-Grenzzugkraft) ohne Momentenabminderung toleriert.

Für gewalzte I- und H-Profile darf das infolge N abgeminderte Moment $M_{Ny,Rd}$ bzw. $M_{Nz,Rd}$ gesetzt werden zu

$M_{Ny,Rd} = 1{,}11\ M_{pl,y,Rd}\ (1\text{-}n) \leq M_{pl,y,Rd}$

mit $n = \dfrac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}}$

und bei

$$n \leq 0{,}2 \qquad M_{Nz,Rd} = M_{pl,z,Rd}$$
$$n > 0{,}2 \qquad M_{Nz,Rd} = 1{,}56\, M_{pl,z,Rd}\,(1-n)\cdot(n+0{,}6)$$

Für geschweißte Querschnitte, Hohl- und Kastenprofile sind die Beziehungen [2], 5.4.8.1 zu entnehmen.

Bei zweiachsiger Biegung und Normalkraft gilt

$$\left(\frac{M_{y,Sd}}{M_{Ny,Rd}}\right)^{\alpha} + \left(\frac{M_{z,Sd}}{M_{Nz,Rd}}\right)^{\beta} \leq 1$$

mit $\alpha = 2; \beta = 5n$ aber $\geq 1$ bei I- und H-Profilen
und $\alpha = 2; \beta = 2$ bei Rundrohren

Als sichere Näherung darf nach DUNKERLEY das folgende Kriterium immer angenommen werden

$$\frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{z,Sd}}{M_{pl,z,Rd}} \leq 1$$

Diese Formel bedeutet nicht anderes, als dass die ungünstige Eckspannung bei Ansatz der plastischen Widerstandmomente die Bemessungsstreckgrenze $f_{y,d} = f_y/\gamma_{M0}$ nicht überschreitet.

Bei Querschnitten der Klasse 3 kann die obige Gleichung ebenfalls angewendet werden, wenn anstelle der plastischen Grenzmomente die elastischen eingesetzt werden:

$$\frac{N_{Sd}}{A \cdot f_{yd}} + \frac{M_{y,Sd}}{W_{el,y} \cdot f_{yd}} + \frac{M_{z,Sd}}{W_{el,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

Bei Querschnitten der Klasse 4 sind anstelle von A und $W_{el}$ die effektiven Querschnittswerte einzusetzen. Wie unter 4.3.3 ist zu beachten, dass es durch örtliches Beulen zu Verschiebungen $e_y$ bzw. $e_z$ des ursprünglichen Schwerpunkts und damit zu Zusatzmomenten $N_{Sd} \cdot e_y$ bzw. $N_{Sd} \cdot e_z$ kommen kann, s. 7.2 .

### 4.3.8 *Biegung, Querkraft und Normalkraft*

Hierbei sind zunächst analog 4.3.6 die Grenzmomente und –normalkräfte zu ermitteln, indem auf den Schubflächen $A_v$ mit der abgeminderten Streckgrenze $(1-\rho)f_y$ gerechnet wird. Dann erfolgt anschließend die M-N-Interaktion nach Abschnitt 4.3.7.

## 4.4 Stabilitätsversagen

### 4.4.1 *Biegeknicken bei zentrischem Druck*

Der Bemessungswiderstand gegen Biegeknicken beträgt

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \beta_A \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}$$

mit $\beta_A$ = 1 für Querschnittsklassen 1, 2 und 3
$\beta_A$ = $A_{eff}$ / A für die Querschnittsklasse 4
$\chi$ = Abminderungsfaktor abhängig von Schlankheitsgrad und Knickspannungslinie
$\gamma_{M1}$ = 1,10

Bei Stäben mit konstantem Querschnitt, dem Schlankheitsgrad $\lambda$ und

$$\lambda_1 = \pi\sqrt{E / f_y} = 93{,}9\varepsilon \quad \left(\varepsilon = \sqrt{235\,\mathrm{N/mm^2} / f_y}\right)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1}\sqrt{\beta_A} = \sqrt{\beta_A \cdot A \cdot f_y / N_{cr}}$$

$N_{cr}$ = Eulersche Knicklast

$\alpha$ = Imperfektionsbeiwert nach Tabelle 7 abhängig von der Knickspannungslinie (KSL)

| KSL | a | b | c | d |
|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | 0,21 | 0,34 | 0,49 | 0,76 |

Tabelle 7 (5.5.1): Imperfektionsbeiwert $\alpha$

$$\varphi = 0{,}5\left[1 + \alpha\left(\bar{\lambda} - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}^2\right]$$

ergibt sich der Abminderungsbeiwert $\chi$ zu

$$\chi = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{jedoch } \chi \leq 1$$

Die Abminderungsbeiwerte $\chi$ können der Tabelle 8 entnommen werden.

| $\bar{\lambda}$ | Knickspannungslinie | | | |
|---|---|---|---|---|
| | a | b | c | d |
| 0,2 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |
| 0,3 | 0,9775 | 0,9641 | 0,9491 | 0,9235 |
| 0,4 | 0,9528 | 0,9261 | 0,8973 | 0,8504 |
| 0,5 | 0,9243 | 0,8842 | 0,8430 | 0,7793 |
| 0,6 | 0,8900 | 0,8371 | 0,7854 | 0,7100 |
| 0,7 | 0,8477 | 0,7837 | 0,7247 | 0,6431 |
| 0,8 | 0,7957 | 0,7245 | 0,6622 | 0,5797 |
| 0,9 | 0,7339 | 0,6612 | 0,5998 | 0,5208 |
| 1,0 | 0,6656 | 0,5970 | 0,5399 | 0,4671 |
| 1,1 | 0,5960 | 0,5352 | 0,4842 | 0,4189 |
| 1,2 | 0,5300 | 0,4781 | 0,4338 | 0,3762 |
| 1,3 | 0,4703 | 0,4269 | 0,3888 | 0,3385 |
| 1,4 | 0,4179 | 0,3817 | 0,3492 | 0,3055 |
| 1,5 | 0,3724 | 0,3422 | 0,3145 | 0,2766 |
| 1,6 | 0,3332 | 0,3079 | 0,2842 | 0,2512 |
| 1,7 | 0,2994 | 0,2781 | 0,2577 | 0,2289 |
| 1,8 | 0,2702 | 0,2521 | 0,2345 | 0,2093 |
| 1,9 | 0,2449 | 0,2294 | 0,2141 | 0,1920 |
| 2,0 | 0,2229 | 0,2095 | 0,1962 | 0,1766 |
| 2,1 | 0,2036 | 0,1920 | 0,1803 | 0,1630 |
| 2,2 | 0,1867 | 0,1765 | 0,1662 | 0,1508 |
| 2,3 | 0,1717 | 0,1628 | 0,1537 | 0,1399 |
| 2,4 | 0,1585 | 0,1506 | 0,1425 | 0,1302 |
| 2,5 | 0,1467 | 0,1397 | 0,1325 | 0,1214 |
| 2,6 | 0,1362 | 0,1299 | 0,1234 | 0,1134 |
| 2,7 | 0,1267 | 0,1211 | 0,1153 | 0,1062 |
| 2,8 | 0,1182 | 0,1132 | 0,1079 | 0,0997 |
| 2,9 | 0,1105 | 0,1060 | 0,1012 | 0,0937 |
| 3,0 | 0,1036 | 0,0994 | 0,0951 | 0,0882 |

Tabelle 8 (5.5.2): Abminderungsfaktor $\chi$

Die Zuordnung der Profile zu den Knickspannungslinien stimmt im wesentlichen mit DIN 18800 T. 2 überein, s. Tabelle 9.

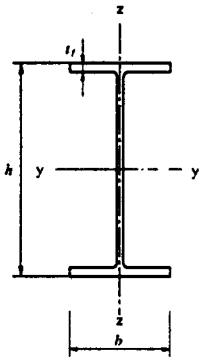
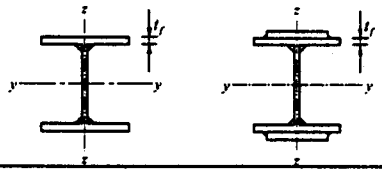
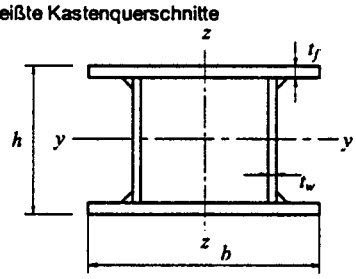
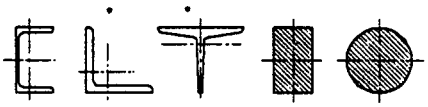
| Querschnitt | Begrenzung | Ausweichen rechtwinklig zur Achse | Knickspannungslinie | |
|---|---|---|---|---|
| | | | S 235<br>S 275<br>S 355<br>S 420 | S 460 |
| Gewalzte I - Profile  | h/b > 1.2<br>$t_f \leq 40$ mm | y - y<br>z - z | a<br>b | $a_0$<br>$a_0$ |
| | 40 mm< $t_f \leq$100 mm | y - y<br>z - z | b<br>c | a<br>a |
| | h/b ≤ 1.2<br>$t_f \leq 100$ mm | y - y<br>z - z | b<br>c | a<br>a |
| | $t_f > 100$ mm | y - y<br>z - z | d<br>d | c<br>c |
| Geschweißte I - Profile  | $t_f \leq 40$ mm | y - y<br>z - z | b<br>c | b<br>c |
| | $t_f > 40$ mm | y - y<br>z - z | c<br>d | c<br>d |
| Hohlprofile | warmgefertigt | jede | a | a |
| | kaltgeformt | jede | b | b |
| Geschweißte Kastenquerschnitte  | allgemein, außer den in der nächsten Zeile beschriebenen Fällen | jede | b | b |
| | dicke Schweißnähte und:<br>$b/t_f < 30$ mm<br>$h/t_f < 30$ mm | y - y<br>z - z | c<br>c | c<br>c |
| U-, L-, T- und Vollquerschnitte  | | jede | c | c |

Tabelle 9 (5.5): Zuordnung der Querschnitte zu den Knickspannungslinien

Eine Ausnahme besteht in der Besserstellung gewalzter I-Profile aus S 460 um generell eine Linie, wobei von a in die bisher nicht verwendete Linie $a_0$ $(\alpha = 0{,}13)$ hochgestuft wird. Die zweite Abweichung betrifft kaltgeformte Hohlprofile. Wird die Streckgrenzenerhöhung auf $f_{ya}$ durch Kaltverformung ausgenutzt, muss statt in b in die KSL c eingestuft werden. Eine Berechnungsformel für $f_{ya}$ ist angegeben.

Für Winkelprofile, die an den Stabenden nur an einem Schenkel, aber mit mindestens 2 Schrauben an steifere Gurte angeschlossen sind, liegt eine exzentrische Belastung vor. Trotzdem dürfen sie als zentrisch gedrückt mit dem größten der drei Schlankheitsgrade $\bar{\lambda}_{eff}$ und KSL c nachgewiesen werden:

$$\bar{\lambda}_{eff,v} = 0{,}35 + 0{,}7 \cdot \bar{\lambda}_v$$

$$\bar{\lambda}_{eff,y} = 0{,}50 + 0{,}7 \cdot \bar{\lambda}_y$$

$$\bar{\lambda}_{eff,z} = 0{,}50 + 0{,}7 \cdot \bar{\lambda}_z$$

Die Achsen sind in Abb. 9 definiert.

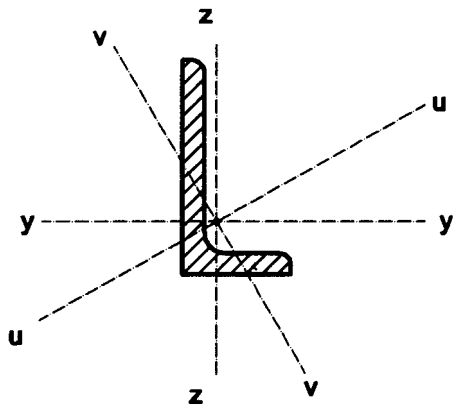



Abb. 9: Achsen eines Winkelprofils

Alternativ zum Ersatzstabverfahren unter Verwendung einer Knicklänge (Anhang II-H enthält umfangreiche Angaben über Knicklängen von Bauteilen in Brücken, die zum großen Teil DIN 18800 T. 2 entnommen sind) und des beschriebenen $\lambda - \chi -$Nachweises besteht die Möglichkeit, den Knicknachweis durch einen Spannungsnachweis nach Theorie II. Ordnung zu ersetzen. Dies ist häufig bei Stabwerken, z. B. Rahmen, sinnvoll. Es kann aber auch beim Einzelstab zweckmäßig sein, wenn sich der Querschnitt über die Stablänge ändert. Wie schon unter 4.1 erwähnt, ist hier eine Imperfektion von

$$e_{0,d} = \alpha \cdot \left(\bar{\lambda} - 0{,}2\right) \cdot \frac{W}{A} \cdot \frac{1 - \chi \bar{\lambda}^2 \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}}}{1 - \chi \bar{\lambda}^2}$$

mit Sinus-, Parabel- oder Bogenverlauf nach Abb.10 anzusetzen. Beim Nachweis mit $W_{el}$ (Querschnittsklasse 3) ist in die obige Formel $W = W_{el}$ einzusetzen, in den Klassen 1 und 2 $W = W_{pl.}$ Bei über die Stablänge veränderlichen Werten W und A ist eine sinnvolle Mittelung vorzunehmen.

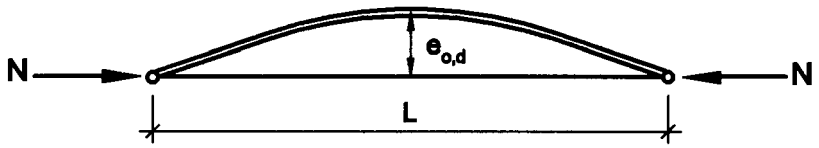



Abb. 10 (5.5.1) Stichmaß $e_{0,d}$ der Imperfektion

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass Spannungsnachweise nach
Theorie II. Ordnung als Stabilitätsnachweise anzusehen sind und demzufolge $\gamma_{M1} = 1{,}1$ zu verwenden ist.

### 4.4.2 *Biegedrillknicken von Trägern*

Bei reiner Biegebeanspruchung (d. h. ohne Druckkraft) gilt für den Bemessungswiderstand $M_{b,Rd}$ gegen Biegedrillknicken (BDK).

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \beta_w W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}$$

mit $\beta_W = 1$ für die Querschnittsklassen 1 und 2

$\beta_W = W_{el,y}/W_{pl,y}$ für die Querschnittsklasse 3

$\beta_W = W_{eff,y}/W_{pl,y}$ für die Querschnittsklasse 4

$\chi_{LT}$ = Abminderungsfaktor für BDK abhängig von Schlankheitsgrad und Knickspannungslinie

$\gamma_{M1} = 1{,}10$

Bei Trägern mit konstantem Querschnitt ist mit

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\beta_w W_{pl,y} f_y}{M_{crit}}}$$

$M_{crit}$ = ideal elastisches Biegedrillknickmoment

$$\varphi_{LT} = 0{,}5\left[1 + \alpha_{LT}\left(\bar{\lambda}_{LT} - 0{,}4\right) + \bar{\lambda}_{LT}^{2}\right]$$

$\alpha_{LT} = 0{,}21$ für Walzprofile (KSL a)
$\alpha_{LT} = 0{,}49$ für geschweißte Profile (KSL c)

$$\chi_{LT} = 1 \qquad \text{für } \bar{\lambda}_{LT} \leq 0{,}4$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^{2} - \bar{\lambda}_{LT}^{2}}} \qquad \text{für } \bar{\lambda}_{LT} > 0{,}4$$

Durch die Einführung des Zahlenwerts 0,4 in die Gleichung für $\varphi_{LT}$ anstelle des früheren Wertes von 0,2 (wie auch bei $\varphi$ für das Biegeknicken) können die $\chi_{LT}$–Werte nicht aus der $\chi$-Tabelle 8 abgelesen werden. Sie sind aber bei gleichen $\bar{\lambda}$ günstiger und berücksichtigen damit die bisherige Kritik, dass der BDK-Nachweis im Eurocode z. T. wesentlich ungünstiger ist als nach DIN 18800 T.2 .

### 4.4.3 *Biegedrillknicken unter Biegung und Zug*

Da die Zugkraft stabilisierend wirkt, ist sie mit $\psi_{vec} = 0{,}8$ abzumindern.

Das äußere Moment

$M_{eff,S,d} = W_{com} \cdot \sigma_{com,Ed}$

muss dann unter dem Grenzmoment gegen BDK $M_{b,Rd}$ nach 4.4.2, d.h. für reine Biegung, bleiben.

Die Spannung $\sigma_{com,Ed}$ in der gedrückten Randfaser wird unter der Zugentlastung wie folgt berechnet.

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{M_{Sd}}{W_{com}} - 0{,}8\frac{N_{t,Sd}}{A}$$

mit

$W_{com}$ = elastisches Widerstandsmoment des Querschnitts bezüglich der gedrückten Randfaser
$N_{t,Sd}$ = Bemessungswert der Zugkraft

### 4.4.4 *Biegeknicken unter Druck und Biegung*

Grundsätzlich ist neben diesem Nachweis zusätzlich der BDK-Nachweis zu führen. Letzterer kann aber bei Hohlprofilen entfallen .

Der Biegeknicknachweis ist bei Querschnitten der Klasse 1 oder 2 zu führen nach

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_{\min} \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_y \cdot M_{y,Sd}}{W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z \cdot M_{z,Sd}}{W_{pl,z} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

mit $k_y = 1 - \dfrac{\mu_y \cdot N_{Sd}}{\chi_y \cdot A \cdot f_y}$ jedoch $k_y \leq 1{,}5$

$\mu_y = \overline{\lambda_y} \cdot (2 \cdot \beta_{My} - 4) + \left[ \dfrac{W_{pl,y} - W_{el,y}}{W_{el,y}} \right]$ jedoch $\mu_y \leq 0{,}90$

$k_z = 1 - \dfrac{\mu_z \cdot N_{Sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_y}$ jedoch $k_z \leq 1{,}5$

$\mu_z = \overline{\lambda_z} \cdot (2 \cdot \beta_{Mz} - 4) + \left[ \dfrac{W_{pl,z} - W_{el,z}}{W_{el,z}} \right]$ jedoch $\mu_z \leq 0{,}90$

$\chi_{min}$ ist der kleinere Wert von $\chi_y$ und $\chi_z$

Dabei sind $\chi_y$ und $\chi_z$ die Abminderungsfaktoren nach 4.4.1 für Knicken um die y- bzw. z-Achse. Die Momentenbeiwerte $\beta_{My}$ und $\beta_{Mz}$ sind dabei Abb. 11 zu entnehmen.

Bei Bauteilen der Querschnittsklasse 3 gilt prinzipiell der gleiche Nachweis, wobei die plastischen durch die elastischen Widerstandmomente zu ersetzen sind. Außerdem ist dort einfacher

$\mu_y = \overline{\lambda}_y \left(2\beta_{My} - 4\right) \leq 0{,}90$ und

$\mu_z = \overline{\lambda}_z \left(2\beta_{Mz} - 4\right) \leq 0{,}90$

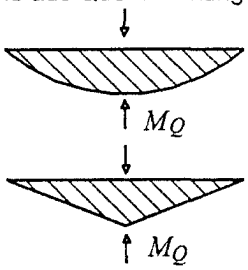
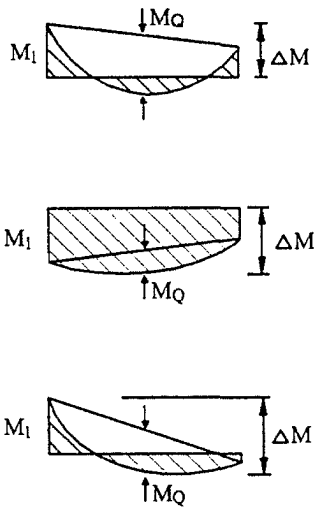
| Momentenverlauf. | Momentenbeiwert $\beta_M$ |
|---|---|
| Stabendmomente<br> <br><br>$-1 \leq \psi \leq 1$ | $\beta_{M,\psi} = 1{,}8 - 0{,}7\,\psi$ |
| Momente aus Querbelastung<br>  <br> | $\beta_{M,Q} = 1{,}3$<br><br>$\beta_{M,Q} = 1{,}4$ |
| Momente aus Querbelastung mit Stabendmomenten<br>  <br> | $\beta_M = \beta_{M,\psi} + (\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi}) \cdot M_Q/\Delta M$<br><br>$M_Q =$<br><br>$\lvert max\ M \rvert$ nur infolge Querbelastung<br><br>$\lvert max\ M \rvert$ bei Momentenverlauf ohne Vorzeichenwechsel<br><br>$\Delta M =$<br><br>$\lvert max\ M \rvert + \lvert min\ M \rvert$ bei Momentenverlauf mit Vorzeichenwechsel |

Abb. 11 (5.5.3): Momentenbeiwerte $\beta_M$

Auch bei Bauteilen der Querschnittsklasse 4 gilt der gleiche Nachweis, wobei im Nenner die effektiven Querschnittswerte $A_{eff}$, $W_{eff,y}$ und $W_{eff,z}$ stehen und die Momente im Zähler um die Zusatzmomente infolge der Schwerpunktverschiebungen $e_{Ny}$ und $e_{Nz}$ infolge örtlichen Ausbeulens verändert werden (s. 7.2). Damit ist nachzuweisen

$$\frac{N_{sd}}{\chi_{min} A_{eff} f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_y \left(M_{y,Sd} + N_{Sd} \cdot e_{Ny}\right)}{W_{eff,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z \left(M_{z,Sd} + N_{Sd} \cdot e_{Nz}\right)}{W_{eff,z} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

Bei der Bestimmung von

$$\mu = \bar{\lambda}\left(2\beta_M - 4\right)$$

sind die Momente $M_{Sd}$ um beide Achsen zur Bestimmung von $\beta_M$ nach Abb. 11 um die Anteile $N_{Sd} \cdot e_N$ zu verändern.

Bei der Klasse 4 werden die effektiven Querschnitte nur unter der Wirkung der Normalspannungen bestimmt. Dies ist nur zulässig, wenn

$\tau_{Sd} \leq 0{,}2 \ f_y / \gamma_{M1}$ und

$\tau_{Sd} \leq 0{,}3 \ \tau_{cr} / \gamma_{M1}$

ist, wobei $\tau_{cr} = k_\tau \cdot \sigma_E$ die ideale Beulschubspannung ist.

Im Sonderfall Druck und einachsige Biegung ist das zweite Moment in den Nachweisgleichungen Null zu setzen.

### 4.4.5 *Biegedrillknicken unter Druck und Biegung*

Bei biegedrillknickgefährdeten Bauteilen, in der Regel bei allen offenen Querschnitten, ist der Nachweis in der Klasse 1 und 2 zu führen nach

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y,Sd}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z \cdot M_{z,Sd}}{W_{pl,z} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

mit $k_{LT} = 1 - \dfrac{\mu_{LT} \cdot N_{Sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_y}$ jedoch $k_{LT} \leq 1$

$\mu_{LT} = 0{,}15 \cdot \overline{\lambda_z} \cdot \beta_{M,LT} - 0{,}15$ jedoch $\mu_{LT} \leq 0{,}90$

Dabei ist $\beta_{M,LT}$ der Momentenbeiwert für BDK, der aus Abb. 11 für $M_{y,Sd}$ zu entnehmen ist, $\chi_z$ der Abminderungsfaktor für Knicken um die z-Achse und $\chi_{LT}$ der Abminderungsfaktor für BDK, s. 4.4.2.

Bei Querschnitten der Klasse 3 sind $W_{pl,y}$ und $W_{pl,z}$ durch die elastischen Widerstandsmomente zu ersetzen.

Für die Querschnittsklasse 4 gilt

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_z A_{eff} f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_{LT}\left(M_{y,Sd} + N_{Sd} \cdot e_{Ny}\right)}{\chi_{LT} W_{eff,y} f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z\left(M_{z,Sd} + N_{Sd} \cdot e_{Nz}\right)}{W_{eff,z} f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

Dabei ist $k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{Sd}}{\chi_z A_{eff} f_y}$ und

$$\mu_{LT} = 0{,}15\bar{\lambda}_z \beta_{M,LT} - 0{,}15 \leq 0{,}90$$

mit $\beta_{M,LT}$ nach Abb. 11 für $\left(M_{y,Sd} + N_{Sd} \cdot e_{Ny}\right)$ zu berechnen.

Auch hier gelten die beim Biegeknicken unter Druck und Biegung (4.4.4) genannten Beschränkungen der Schubspannungen $\tau_{Sd}$, damit deren Beuleinfluss auf die effektiven Querschnitte gering bleibt.

### 4.4.6 *Sonstige Stabilitätsfälle*

Das Schubbeulen und der Nachweis von Stegblechen unter örtlicher Querbelastung werden unter 7.4 behandelt.

# 5 Verbindungsmittel, Schweißnähte und Anschlüsse unter statischer Beanspruchung

## 5.1 Allgemeine Anforderungen an Verbindungen im Brückenbau

Folgende Verbindungen sind im Brückenbau nicht zulässig:

- Verbindungen mit nur einer Schraube (außer bei untergeordneten Bauteilen)
- Verbindungen, die vor Erreichen des Grenzzustands gleiten
- GV-Verbindungen mit einem Lochspiel > 1mm
- übergroße Löcher und Langlöcher
- Injektionsschrauben
- nicht durchgeschweißte Stumpfnähte
- unterbrochene Kehl- und Stumpfnähte
- nicht aufgeschmolzene Heftstellen

Weiter sind im Eisenbahnbrückenbau nicht zulässig:

- hybride Verbindungen
- Kontaktstöße

Generell ist zu beachten:

- Lamellen und Steifen sind immer zu umschweißen
- wenn HV-Schrauben pulsierend auf Zug beansprucht werden, sind sie in Güteklasse 10.9 vorzusehen und voll vorzuspannen

Bei Anschlüssen von Bauteilen müssen sich deren Schwereachsen in der Regel in einem Punkt schneiden. Exzentrizitäten sind in der Regel zu berücksichtigen. Bei Schraubenanschlüssen von Winkeln und T-Profilen mit ≥ 2 Schrauben darf der Abstand der Risslinien von den Schwereachsen vernachlässigt werden.

## 5.2 Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_M$

Es gelten folgende Festlegungen

- Widerstand von Schraubenverbindungen $\gamma_{Mb} = 1{,}25$
- Widerstand von Nietverbindungen $\gamma_{Mr} = 1{,}25$
- Widerstand von Bolzenverbindungen $\gamma_{Mp} = 1{,}25$
- Widerstand von Schweißverbindungen $\gamma_{Mw} = 1{,}25$
- Widerstand gegen Gleiten vorgespannter Verbindungen: im GZT $\gamma_{Ms,ult} = 1{,}25$
  im GZG $\gamma_{Ms,ser} = 1{,}10$

## 5.3 Schrauben- , Niet- und Bolzenverbindungen

### 5.3.1 *Rand- und Lochabstände für Schrauben und Niete*

Die kleinsten Randabstände $e_1$ in Kraftrichtung und $e_2$ quer zur Kraftrichtung, siehe Abb. 12, müssen 1,5 $d_0$ ($d_0$ = Lochdurchmesser) betragen. Die Größtwerte für $e_1$ oder $e_2$ betragen 12t oder 150 mm, der größere Wert ist maßgebend. Bei Korrosionsgefahr (z.B. Bauteile im Freien) darf 40 mm + 4t (t = minimale Blechdicke) nicht überschritten werden.

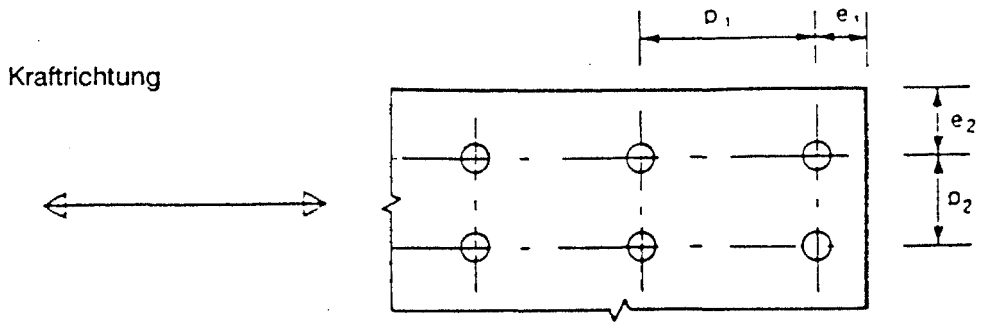



Abbildung 12 (6.5.1): Bezeichnung der Rand -und Lochabstände

Der kleinste Lochabstand $p_1$ in Kraftrichtung sollte 2,5 $d_0$ betragen, $p_2$ quer dazu 3,0 $d_0$. Bei Reduzierung von $p_2$ auf 2,5 $d_0$ muss die Grenzlochleibungskraft auf 2/3 abgemindert werden. Die größten Lochabstände $p_1$ in Kraftrichtung und $p_2$ quer dazu dürfen in druckbeanspruchten Bauteilen (Beulgefahr!) den kleineren Wert von 14t oder 200 mm nicht überschreiten. Dabei dürfen die Verbindungsmittel nach Abb. 13 versetzt angeordnet werden.

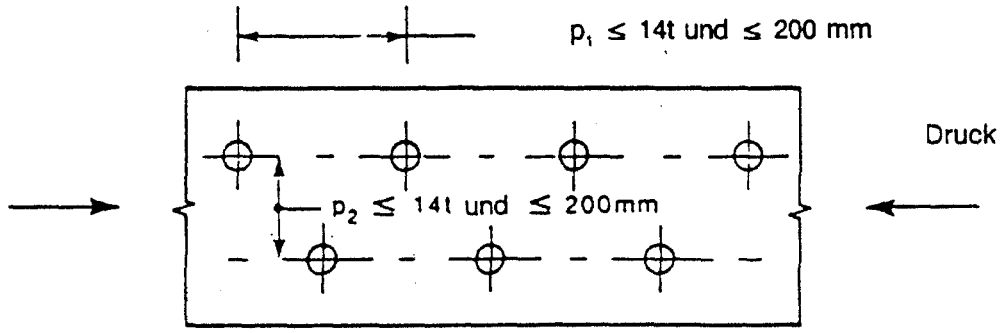



Abbildung 13 (6.5.2): Versetzte Lochanordnung bei druckbeanspruchten Bauteilen

Bei Zugbeanspruchung dürfen die Lochabstände $p_{1,i}$ der innen liegenden Verbindungsmittel verdoppelt werden, siehe Abb. 14.

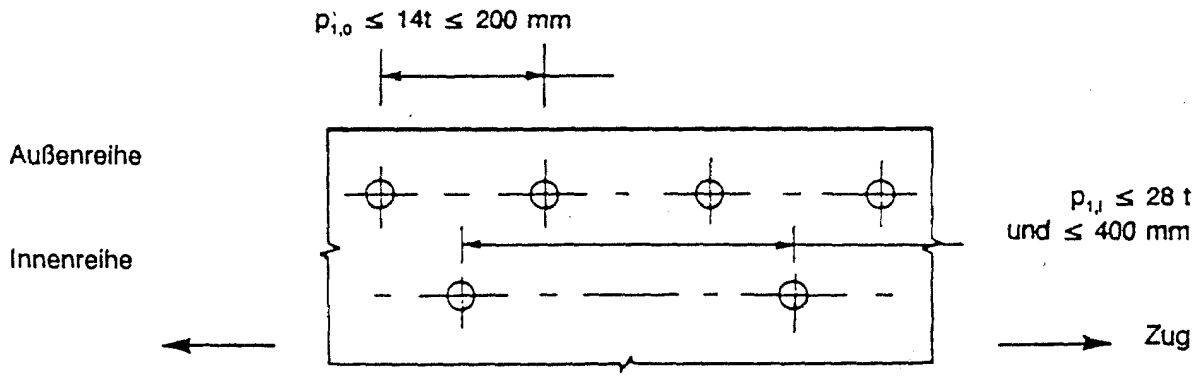



Abbildung 14 (6.5.3) : Lochabstände bei zugbeanspruchten Bauteilen

### 5.3.2 *Querschnittsschwächung durch Schrauben- und Nietlöcher*

Beim Versagen durch Scherbruch entlang der Linien in Abb. 15 ist die Grenztragfähigkeit

$$V_{eff,Rd} = \frac{f_y \cdot A_{v,eff}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

Hierbei gilt $A_{v,eff} = t \cdot L_{v,eff}$

mit $L_{v,eff} = L_v + a_1 + (a_2 - 0{,}5 \cdot d_0) \cdot (f_u/f_y)$ und $t$ = Stegdicke

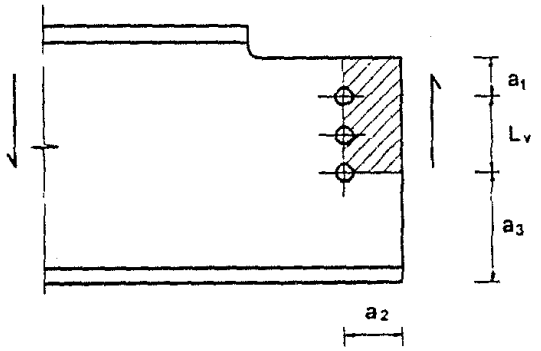



Abbildung 15 (6.5.5): Wirksame Scherbruchfläche

Für andere Anschlussbedingungen sind ebenfalls die Beziehungen für $L_{v,eff}$ angegeben.

Bei einschenkligem Anschluss von Winkelprofilen sind generell Exzentrizität und Lochanordnung zu berücksichtigen. Für die Anschlüsse nach Abb.16 darf jedoch die Grenzzugkraft

des Nettoquerschnitts wie für zentrische Belastung nach den folgenden Beziehungen bestimmt werden:

bei 1 Schraube $$N_{u,Rd} = \frac{2 \cdot (e_2 - 0{,}5 \cdot d_0) \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

bei 2 Schrauben $$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

bei ≥ 3 Schrauben $$N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

Die vom Lochabstand $p_1$ abhängenden Abminderungsbeiwerte $\beta_2$ und $\beta_3$ sind Tab.10 zu entnehmen und ggf. zu interpolieren.

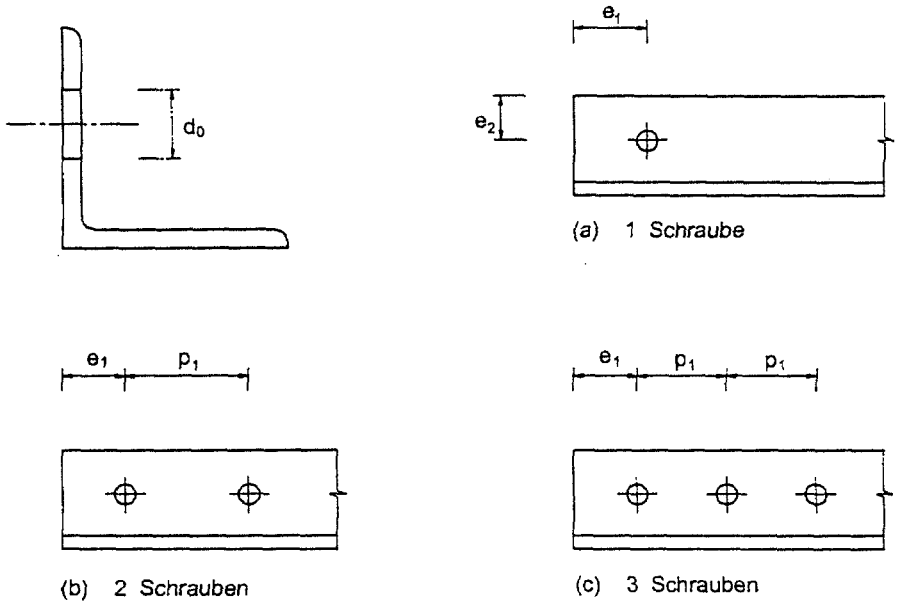



Abbildung 16 (6.5.6): Winkelanschlüsse an einem Schenkel

| | | | |
|---|---|---|---|
| Lochabstand | $p_1$ | ≤ 2,5 $d_0$ | ≥ 5,0 $d_0$ |
| 2 Schrauben | $\beta_2$ | 0,4 | 0,5 |
| 3 Schrauben und mehr | $\beta_3$ | 0,5 | 0,7 |

Tabelle 10 (6.5.1): Abminderungsbeiwerte $\beta_2$ und $\beta_3$

### 5.3.1 *Einteilung der Schraubenverbindungen*

Die Einteilung der Schraubenverbindungen in die Kategorien A - C (Scher-/Lochleibungs- und gleitfeste Verbindungen) sowie D und E (Zugbeanspruchung) ist in Tab. 11 dargestellt.

Scher-/Lochleibungs- und gleitfeste Verbindungen

| Kategorie | Kriterium | | | Anmerkungen |
|---|---|---|---|---|
| A<br>Scher-/Lochleibungsverbindung | $F_{v.Sd}$<br>$F_{v.Sd}$ | $\leq$<br>$\leq$ | $F_{v.Rd}$<br>$F_{b.Rd}$ | Keine Vorspannung erforderlich. alle Schrauben-Festigkeitsklassen von 4.6 bis 10.9 |
| B<br>Gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit | $F_{v.Sd.ser}$<br>$F_{v.Sd}$<br>$F_{v.Sd}$ | $\leq$<br>$\leq$<br>$\leq$ | $F_{s.Rd.ser}$<br>$F_{v.Rd}$<br>$F_{b.Rd}$ | Hochfeste vorgespannte Schrauben; kein Gleiten im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit |
| C<br>Gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Tragfähigkeit | $F_{v.Sd}$<br>$F_{v.Sd}$ | $\leq$<br>$\leq$ | $F_{s.Rd}$<br>$F_{b.Rd}$ | Hochfeste vorgespannte Schrauben; kein Gleiten im Grenzzustand der Tragfähigkeit |

Zugbeanspruchte Verbindungen

| Kategorie | Kriterium | | | Anmerkungen |
|---|---|---|---|---|
| D<br>nichtvorgespannt | $F_{t.Sd}$ | $\leq$ | $F_{t.Rd}$ | Keine Vorspannung erforderlich. Alle Schrauben-Festigkeitsklassen von 4.6 bis 10.9 |
| E<br>vorgespannt | $F_{t.Sd}$ | $\leq$ | $F_{t.Rd}$ | Hochfeste vorgespannte Schrauben |

**Erläuterungen:**

$F_{v.Sd.ser}$ = Bemessungswert der Abscherkraft pro Schraube im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
$F_{v.Sd}$ = Bemessungswert der Abscherkraft pro Schraube im Grenzzustand der Tragfähigkeit
$F_{v.Rd}$ = Grenzabscherkraft pro Schraube
$F_{b.Rd}$ = Grenzlochleibungskraft pro Schraube
$F_{s.Rd.ser}$ = Grenzgleitkraft pro Schraube im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
$F_{s.Rd}$ = Grenzgleitkraft pro Schraube im Grenzzustand der Tragfähigkeit
$F_{t.Sd}$ = Bemessungswert der Zugkraft pro Schraube im Grenzzustand der Tragfähigkeit
$F_{t.Rd}$ = Grenzzugkraft pro Schraube

Tabelle 11 (6.5.2): Einteilung der Schraubenverbindungen

Zusätzlich ist festgelegt, dass bei Abscherbeanspruchung entweder gleitfest vorgespannte oder Passschrauben (Ausnahme sekundäre Elemente) verwendet werden. Bei Passschrauben darf die Scherfläche nicht im Bereich des Gewindes liegen. Vorgespannte Schrauben der Kategorie B und zugbeanspruchte Schrauben der Kategorie D sollten im Brückenbau nicht verwendet werden.

### 5.3.2 *Verteilung der Schnittgrößen auf die Verbindungsmittel*

Die Verteilung hat linear elastisch zu erfolgen. Ein Beispiel ist in Abb. 17 gegeben.

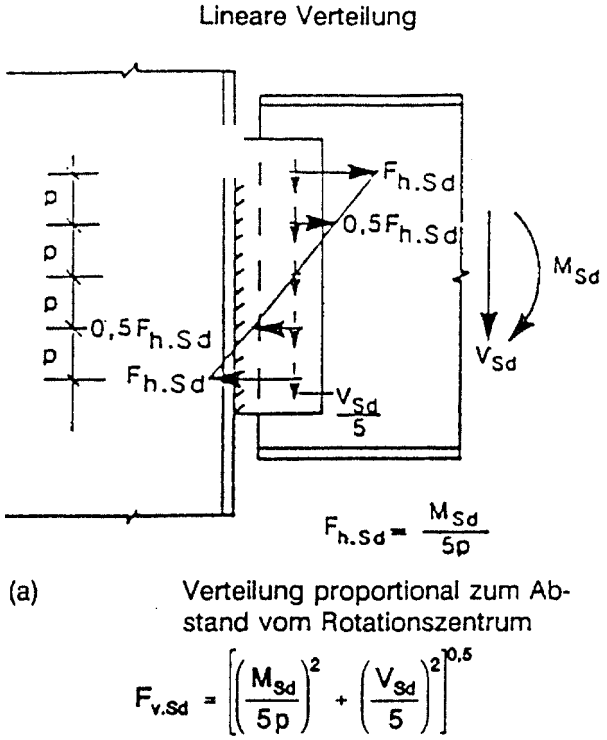



Abbildung 17 (6.5.7): Linear elastische Schnittgrößenverteilung

Die im Hochbau (bei maßgebender Lochleibung) zulässige plastische Verteilung ist im Brückenbau nicht erlaubt.

### 5.3.3 *Beanspruchbarkeit der Schrauben*

Die Bemessungswerte der Beanspruchbarkeit sind in Tab. 12 zusammengestellt.

Grenzabscherkraft pro Scherfuge:

wenn das Gewinde der Schraube in der Scherfuge liegt:

- für Festigkeitsklassen 4.6, 5.6, und 8.8:

$$F_{v,Rd} = \frac{0{,}6\, f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb}}$$

- für Festigkeitsklasse 10.9

$$F_{v,Rd} = \frac{0{,}5\, f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb}}$$

wenn der Schaft der Schraube in der Scherfuge liegt:

$$F_{v,Rd} = \frac{0{,}6\, f_{ub} A}{\gamma_{Mb}}$$

---

Grenzlochleibungskraft: *)

$$F_{b,Rd} = \frac{2{,}5\ \alpha\, f_u\ d\ t}{\gamma_{Mb}}$$

wobei α der kleinste Wert ist von:

$$\frac{e_1}{3d_0}\ ;\ \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}\ ;\ \frac{f_{ub}}{f_u}\ \ oder\ \ 1{,}0$$

---

Grenzzugkraft:

$$F_{t,Rd} = \frac{0{,}9\, f_{ub}\, A_s}{\gamma_{Mb}}$$

---

$A$ = Schaftquerschnittsfläche der Schraube

$A_s$ = Spannungsquerschnittsfläche der Schraube

$d$ = Schaftdurchmesser der Schraube

$d_0$ = Lochdurchmesser

Tabelle 12 (6.5.3): Bemessungs-Beanspruchbarkeit von Schrauben

Bei den Nachweisen ist zu beachten, dass die Zugbelastung $F_{t,Sd}$ einer Schraube durch Abstützkräfte, z.B. in einer Stirnplattenverbindung, anwachsen kann. Bei dünnen Blechen ($t < 0{,}5$ Schraubendurchmesser d) ist ggf. auch Ausknöpfen (Durchstanzen) unter Zug zu untersuchen.

Sind Schrauben gleichzeitig auf Abscheren und Zug beansprucht, muss die Interaktionsbedingung

$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Sd}}{1{,}4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1$$

eingehalten werden.

Die **Grenzgleitkraft hochfester Schrauben** beträgt

$$F_{S,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{Ms}} \cdot F_{p,Cd}$$

mit:

| | | | |
|---|---|---|---|
| $F_{p,Cd}$ | = | Grenzvorspannkraft (i.a. $0{,}7 \cdot f_{ub} \cdot A_S$) | |
| $\mu$ | = | Reibbeiwert | $\mu$=0,5 z.B. gestrahlt |
| | | | $\mu$=0,4 z.B. Alkali-Zink-Silikat-Anstrich |
| | | | $\mu$=0,3 z.B. Drahtbürste oder Flammstrahlen |
| | | | $\mu$=0,2 unbehandelt |
| n | = | Zahl der Gleitfugen | |
| $k_S$ | = | 1,0 bei normalen Lochspiel | |

Wird die Grenzvorspannkraft $F_{p,Cd}$ durch eine äußere Zugbelastung $F_{t,Sd}$ der Schraube abgebaut, ist in obiger Gleichung ($F_{p,Cd}$ - 0,8· $F_{t,Sd}$) statt $F_{p,Cd}$ zu setzen.

Bei **langen Schrauben- oder Nietanschlüssen** kommt es im ersten und im letzten Verbindungsmittel aufgrund der Dehnung der Verbindung zu höheren Beanspruchungen als im Durchschnitt. Dies wird durch einen Abminderungsfaktor $\beta_{LF}$ für die Grenzabscherkraft $F_{v,Rd}$ berücksichtigt:

$$\beta_{LF} = 1 - \frac{L_j - 15 \cdot d}{200 \cdot d} \leq 1{,}00 \quad \text{, aber} \geq 0{,}75$$

$L_j$ = Abstand vom ersten zum letzten Verbindungsmittel in Kraftrichtung
d = Schaftdurchmesser

### 5.3.4 *Bolzenverbindungen*

Die Tragfähigkeit der Bolzen auf Schub und Biegung sowie der Augen auf Lochleibung wird fast übereinstimmend mit DIN 18800 T.1 geregelt, allerdings wird hier generell der Faktor $\gamma_{Mp}$ = 1,25 anstelle $\gamma_M$ = 1,1 nach DIN verwendet. Die Regeln zur Gestaltung und Dimensionierung der Augen sind ebenfalls ähnlich der DIN.

Zusätzlich ist eine Begrenzung der Pressung in der Lochleibung im Gebrauchszustand geregelt. Die Pressung ist hoch, wenn der Bolzendurchmesser d wesentlich kleiner ist als der Lochdurchmesser $d_0$. Es muss nach HERTZ gelten:

$$\sigma_{h,Ed} = 0{,}591 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot F_{Sd,ser} \cdot (d_0 - d)}{d^2 \cdot t}} \leq 2{,}5 \cdot f_y$$

$F_{Sd,ser}$ ist unter der seltenen Kombination im GZG zu berechnen
t = Wandungsdicke

## 5.4 Schweißverbindungen

### 5.4.1 *Allgemeine Voraussetzungen*

- Der Baustahl muss schweißbar sein (siehe 2)
- Es können alle Lichtbogenschweißverfahren (gem. prEN 24063) eingesetzt werden.
- Materialdicken ≥ 4 mm
- Kehlnahtdicke $a \geq \sqrt{t} - 0{,}5$ , jedoch ≥ 3 mm bei t ≤ 30 mm
  a ≥ 5 mm bei 30 < t ≤ 60 mm
  t = größte Dicke der zu verbindenden Teile
- Beim Schweißen an kaltverformten Bereichen sind die Blechdicken und Umformgrade einzuhalten (in [2], Tab. 6.0)
- Bei Eisenbahnbrücken ist bei Stumpfnähten
  - die Wurzel auszufugen und gegenzuschweißen oder
  - die Wurzel auf Keramikleiste (in Ausnahmefällen Stahlleiste) zu schweißen
- Bei tragenden Kehlnähten muss der Öffnungswinkel zwischen 60° und 120° liegen
- Einseitige Kehlnähte sind zu vermeiden (Ausnahme Anschluss von Hohlprofilen durch umlaufende einseitige Naht)
- Bezüglich Terassenbruchgefahr ist DASt-Richtlinie 014 zu beachten. Zwei Beispiele für geeignete und ungeeignete Verbindungen zeigt Abb. 18

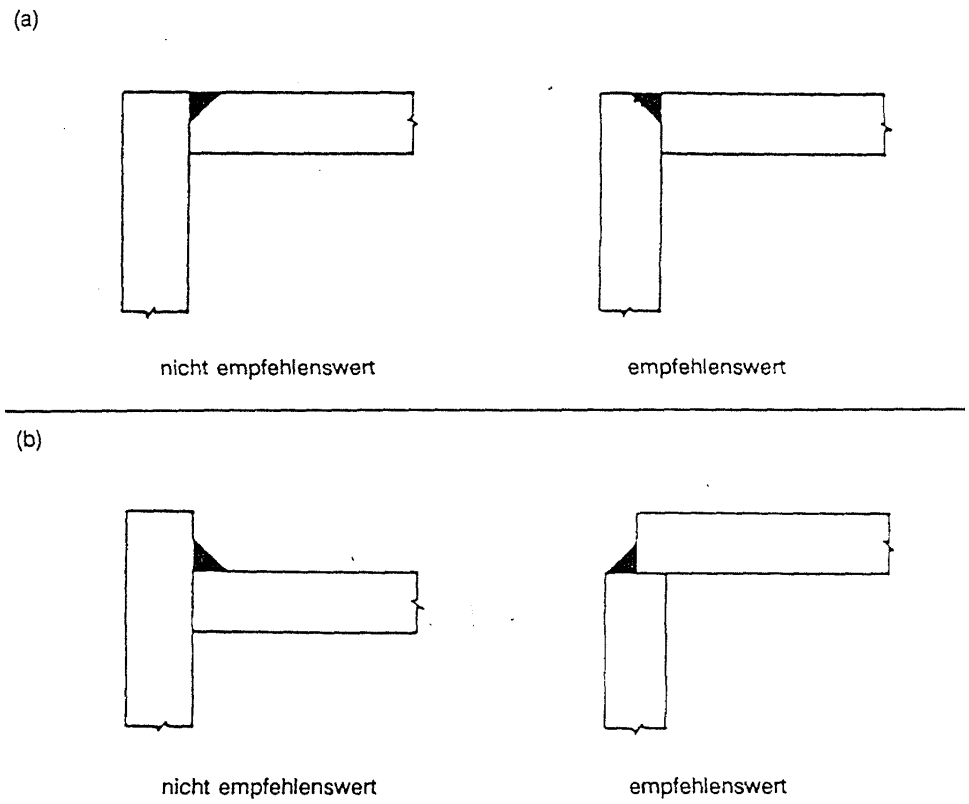



Abbildung 18 (6.6.5): Schweißdetails mit unterschiedlicher Terrassenbruchgefahr

### 5.4.2 *Beanspruchbarkeit von Kehlnähten*

Bei durchgängig vollem Querschnitt darf die gesamte Kehlnahtlänge ohne Endkraterabzug als wirksam angesetzt werden. Nähte mit wirksamen Längen unter 40 mm oder, falls kürzer, 6·a sind nicht als tragend anzusetzen. Die Tragfähigkeit von Kehlnähten, die in Kraftrichtung länger als $L_j = 150 \cdot a$ sind, ist mit

$$\beta_{LW} = 1{,}2 - 0{,}2 \cdot L_j / (150 \cdot a)$$

abzumindern.

Die Nahtdicke a ist als Höhe des einbeschriebenen gleichschenkligen Dreiecks bis zum theoretischen Wurzelpunkt zu messen, siehe Abb. 19.

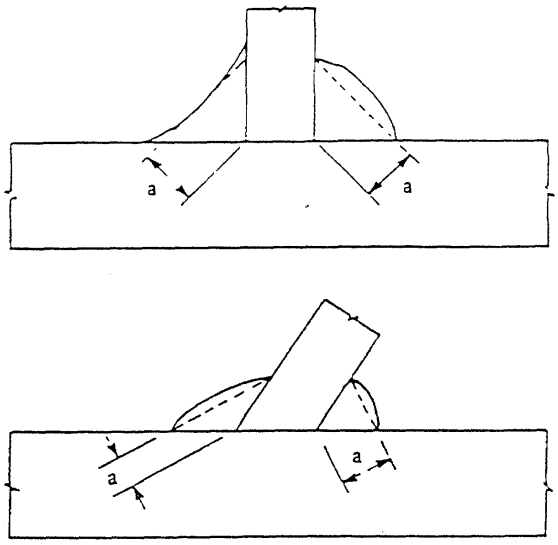



Abbildung 19 (6.6.6): Kehlnahtdicke

Bei automatischer UP-Schweißung darf a um 20%, maximal um 2 mm, vergrößert werden.

Damit ist die Grenztragfähigkeit einer Kehlnaht der Länge L

$$F_{w,Rd} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{Mw}} \cdot a \cdot L$$

wobei $f_u$ die geringere Zugfestigkeit der verbundenen Teile und $\beta_W$ ein Korrelationsbeiwert ist, der die höhere Festigkeit von Schweißnähten besonders gegenüber normalfesten Grundwerkstoff berücksichtigt, siehe Tab. 13.

| Nennwert der Stahlzugfestigkeit $f_u$ [N/mm²] | Korrelationsbeiwert $\beta_w$ |
|---|---|
| ≤ 390 | 0,8 |
| 400 bis 460 | 0,85 |
| 470 bis 510 | 0,9 |
| ≥ 520 | 1,0 |

Tabelle 13 (6.0): Korrelationsbeiwert $\beta_w$ für Kehlnähte

Zu beachten ist beim Nachweis

$$F_{w,Sd} \leq F_{w,Rd} ,$$

dass entsprechend Abb. 20 $F_{w,Sd}$ als räumliche Resultierende aus Normalkraftbeanspruchung senkrecht zur Naht und Schubbeanspruchung längs und quer zur Naht zu berechnen ist.

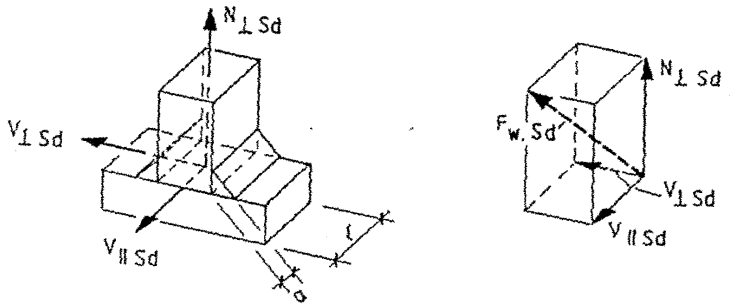



Abbildung 20 : Ermittlung von $F_{w,Sd}$

### 5.4.3 *Tragfähigkeit von Stumpfnähten*

Die Tragfähigkeit einer durchgeschweißten Stumpfnaht kann im Regelfall gleich der Tragfähigkeit des schwächeren der verbundenen Bauteile (geringere Dicke und/oder geringere Festigkeit) angenommen werden.

### 5.4.4 *Anschlüsse an unausgesteiften Flanschen*

Wegen der Nachgiebigkeit der Flansche ist bei Anschlüssen nach Abb. 21 mit einer reduzierten wirksamen Breite für Grundwerkstoff und Schweißnähte zu rechnen.

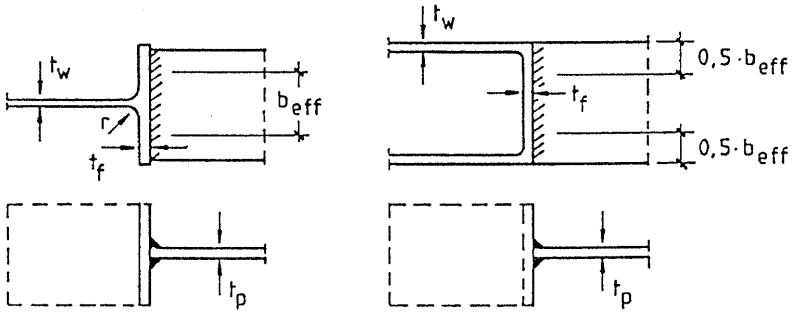



Abbildung 21: Wirksame Breite $b_{eff}$ unausgesteifter T-Stoß-Anschlüsse

Beim I-Querschnitt gilt

$$b_{eff} = t_w + 2\cdot r + 7\cdot t_p \leq t_w + 2\cdot r + 7\cdot(t_f^2/\, t_p)\cdot(f_y/f_{yp}) \,,$$

beim Kastenquerschnitt

$$b_{eff} = 2\cdot t_w + 5\cdot t_p \leq 2\cdot t_w + 5\cdot(t_f^2/\, t_p)\cdot(f_y/f_{yp}) \,,$$

mit $f_y$ = Streckgrenze des Bauteils
$f_{yp}$ = Streckgrenze des Blechs

### 5.4.5 *Hybridverbindungen*

Verschiedene Verbindungsmittel im selben Anschluss oder Stoß wirken nur zusammen bei gleichem Verformungsverhalten. Gemeinsame Kraftübertragung darf daher (außer bei Eisenbahnbrücken) nur angenommen werden bei

- Nieten und Passschrauben oder
- GVP-Verbindungen und Schweißnähten

# 6 Werkstoffermüdung

## 6.1 Allgemeines

Ein Ermüdungsnachweis ist in der Regel nicht erforderlich für

- Geh- und Radwegbrücken (außer bei großer Schwingungsanfälligkeit)
- Bauteile von Eisenbahn- oder Straßenbrücken, die nicht durch Verkehr belastet werden
- orthotrope Platten von Straßenbrücken bei Ausbildung nach 7.5.1

In ermüdungsbeanspruchten Bauteilen müssen alle Nennspannungen (d.h. ohne Kerbwirkungen) im elastischen Bereich bleiben. Für die Schwingbreiten muss daher gelten:

$$\Delta\sigma_d \leq 1{,}5 \cdot f_y \qquad \Delta\tau_d \leq 1{,}5 \cdot f_y / \sqrt{3}$$

Kein Ermüdungsnachweis ist erforderlich, wenn gilt

$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma \leq 26 / \gamma_{Mf}$ [N/mm²] oder

$$N \leq 2 \cdot 10^6 \cdot \left[ \frac{36 / \gamma_{Mf}}{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E.2}} \right]^3$$ oder

$$\gamma_{Ff} \cdot \max \Delta\sigma \leq \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf}$$

$\Delta\sigma_{E.2}$ = schadensäquivalente Schwingbreite für N = $2 \cdot 10^6$

$\Delta\sigma_D$ = Ermüdungsfestigkeit bei N = $5 \cdot 10^6$ (Dauerfestigkeit), siehe Abb. 22

## 6.2 Ermüdungswiderstand

Die charakteristischen Werte der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ (bei Einstufenbeanspruchung) in Abhängigkeit vom Kerbfall und der Spannungsspielzahl N gibt Abb. 22 für Längsspannungen an.

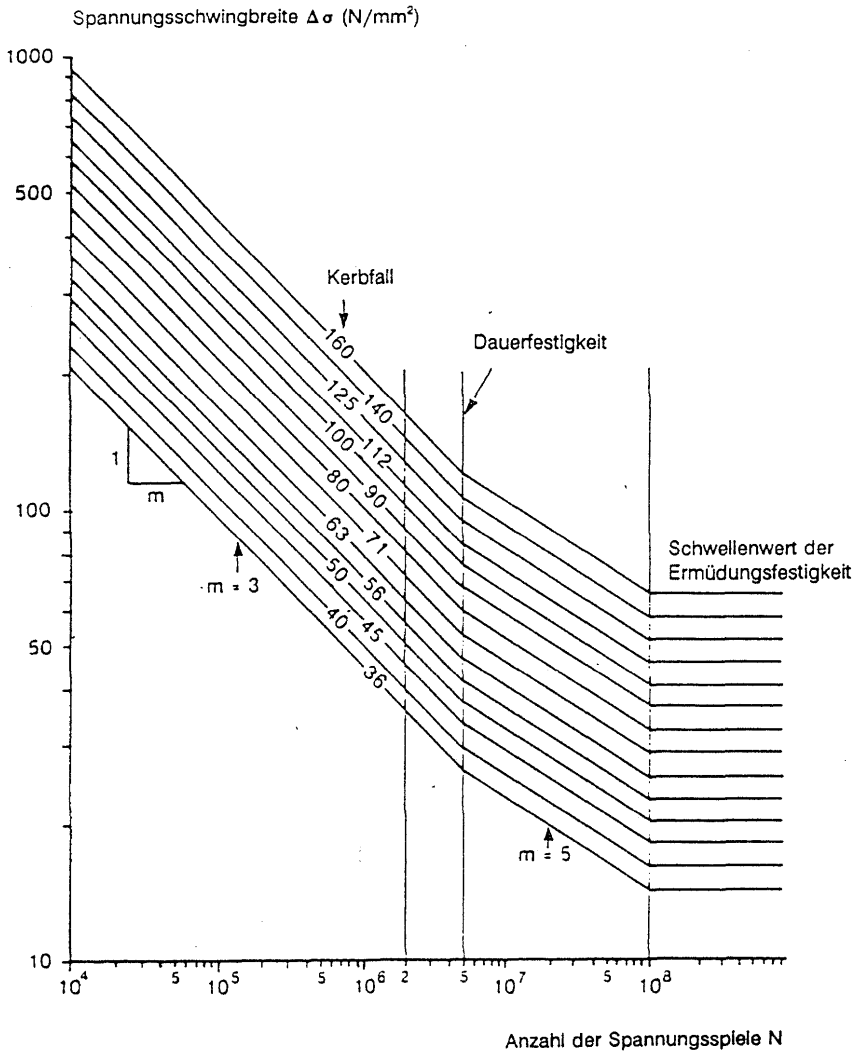
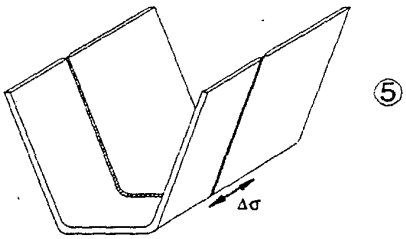
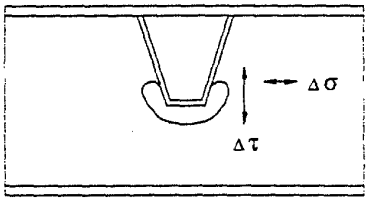
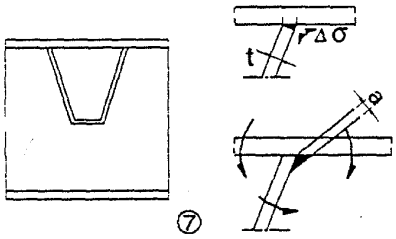



Abbildung 22 (9.1.2): Ermüdungsfestigkeitskurven für Spannungsschwingbreiten der Längsspannungen

In DIN V ENV 1993-1-1 gibt es noch andere Ermüdungsfestigkeitskurven, insbesondere auch für Schubspannungen und für Hohlprofilanschlüsse. Ebenso ist eine umfangreiche Zuordnung der Schweißdetails zu den Kerbgruppen vorhanden. Im DIN-Fachbericht 103 [2], Anhang II-L sind diese Kerbfalltabellen noch um brückenbautypische Details ergänzt. Ein Beispiel zeigt Tab. 14.

| Kerb-gruppe | Konstruktionsdetail | | Beschreibung | Anforderung | Bemerkung |
|---|---|---|---|---|---|
| 112 | siehe Tab. I.L.3 Detail 1), 2), 3) |   ⑤ | 5) Von beiden Seiten voll durchgeschweißte Naht ohne Badsicherung*. | 5) Der Nachweis ist abhängig von der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe infolge Biegung zu führen. | |
| 90 | siehe Tab. I.L.3 Detail 4), 5) | | | | |
| 80 | siehe Tab. I.L.3 Detail 6), 7) | | | | |
| 36 | |   ⑥ | 6) Anschluß einer durchgehenden Längsrippe an den Querträger | 6) Der Nachweis ist abhängig von der Kombination der Spannungsschwingbreite $\Delta\tau$ infolge Querkraft und der Spannungsschwingbreite infolge Biegung $\Delta\sigma$ im Steg mit einer äquivalenten Spannungsschwingbreite zu führen: $\Delta\sigma_{eq}=[\Delta\sigma^2+\Delta\tau^2]^{0,5}$ | $\Delta\sigma_{eq}=\sqrt{\Delta\sigma^2+\Delta\tau^2}$ |
| 71 | siehe I.L.5 Detail 10) |   ⑦ | 7) Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe | 7) Der Nachweis ist abhängig von der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ infolge Biegung in der Schweißnaht aus Querbiegung zu führen. | |
| 50 | siehe I.L.5 Detail 11) | | | | |

* Für Eisenbahnbrücken sind einseitig durchgeschweißte Nähte nicht zulässig.

Tabelle 14 (II-L.8, Bl.2): Einstufung von Konstruktionsdetails - orthotrope Platten von Eisenbahnbrücken

## 6.3 Ermüdungsbelastung

Für Straßenbrücken ist das Ermüdungslastmodell 3 und die Zahl $N_{obs}$ der LKW pro Jahr und Streifen nach DIN-Fachbericht 101 [1] oder nach den Ausschreibungsunterlagen anzusetzen.

Bei Eisenbahnbrücken ist im vereinfachten Nachweis das Lastmodell 71 einschließlich dynamischem Beiwert $\Phi_2$ anzusetzen.

Damit kann die Schwingbreite $\Delta\sigma_p$ nach

$$\Delta\sigma_p = \left|\sigma_{p,\max} - \sigma_{p,\min}\right|$$

bestimmt werden. Hierbei werden nur die Spannungen $\sigma_p$ infolge des jeweiligen Lastmodells betrachtet, das auf der Einflusslinie so verschoben wird, dass sich die maximale bzw. minimale Spannung ergibt.

Da in der Realität die Fahrzeuge anders aussehen als die Verkehrslastmodelle, die Spannungsspielzahlen meist stark von der Zahl der Überfahrten abweichen, neben schweren Fahrzeugen auch leichtere zu beachten sind, die Verkehrsintensität und die Lebensdauer unterschiedlich sind und es auch Einflüsse aus Nebenspuren bzw. Nachbargleisen gibt, wird dem Nachweis meist eine schädigungsäquivalente Einstufen-Schwingbreite $\Delta\sigma_{E.2}$ zugrunde gelegt. Sie erzeugt bei $N = 2 \cdot 10^6$-fachem Auftreten den gleichen Ermüdungsschaden wie das wirkliche Spannungsspektrum mit unterschiedlichen Amplituden und meist wesentlich von $2 \cdot 10^6$ abweichenden Schwingspielzahlen. Es gilt:

$$\Delta\sigma_{E.2} = \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_p$$

Der bei Eisenbahnbrücken definierte Schwingbeiwert $\Phi_2$ ist für Straßenbrücken gleich 1,0 zu setzen.

Der Betriebslastfaktor $\lambda$ erfasst die o.g. komplizierte Betriebsfestigkeitsproblematik.

Für **Straßenbrücken** gilt:

$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4$ jedoch $\lambda \leq \lambda_{max}$

mit

$\lambda_1$ = Spannweitenbeiwert, der in Diagrammen, z.B. nach Abb. 23, festgelegt ist. Er berücksichtigt vor allem die Tatsache, dass bei kleinen Stützweiten bei LKW-Überfahrt mehr Spannungsspiele entstehen als bei großen, und auch die Form der Einflusslinie

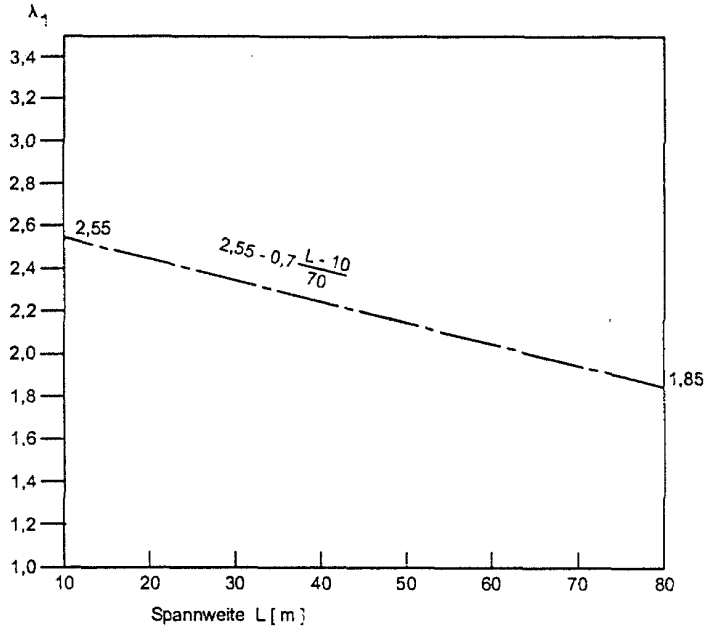



Abbildung 23 (9.1): Spannweitenbeiwert $\lambda_1$ für Feldmomente bei Straßenbrücken

$$\lambda_2 = \frac{Q_{ml}}{480kN} \cdot \left( \frac{N_{obs}}{500000} \right)^{\frac{1}{5}}$$

Verkehrsstärkenbeiwert, der das mittlere LKW-Gewicht $Q_{ml}$ und die Zahl $N_{obs}$ der LKW pro Jahr in der Schwerlastspur berücksichtigt. Er schwankt zwischen 0,36 bei $Q_{ml}$ = 200 kN und $N_{obs}$ = 250000 und 1,65 bei 600 kN / $2 \cdot 10^6$.

$\lambda_3$ = $(t_{Ld}/100)^{1/5}$ Lebensdauerbeiwert. Er ist 1,00, wenn die festgelegte Bemessungslebensdauer $t_{Ld}$ 100 Jahre beträgt.

$\lambda_4$ = Spurbeiwert, der Ermüdungseffekte aus Nebenspuren berücksichtigt. Er wird i.a. nur knapp über 1 liegen.

$\lambda_{max}$ = obere Grenze für $\lambda$, die die Dauerfestigkeit berücksichtigt. Sie ist z.B. für Feldmomente in Abb. 24 festgelegt.

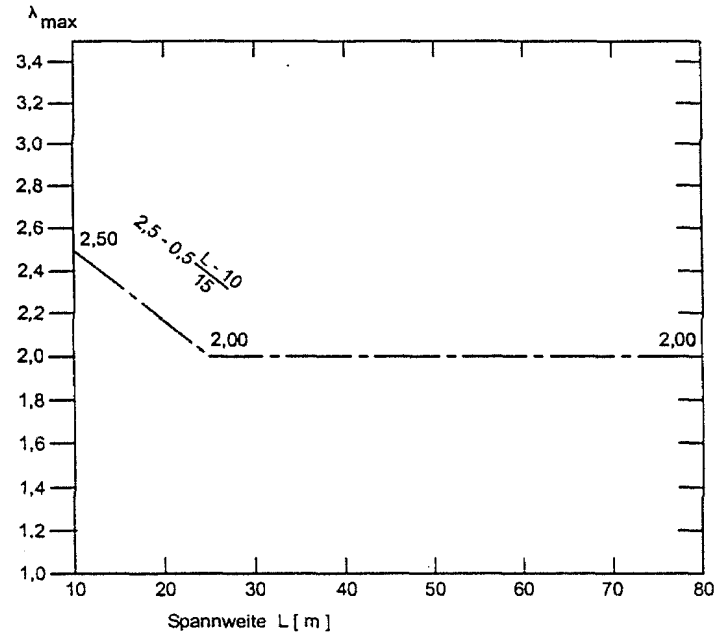



Abbildung 24 (9.3): $\lambda_{max}$ für Feldmomente bei Straßenbrücken

Für den Betriebslastfaktor $\lambda$ von **Eisenbahnbrücken** ist festgelegt:

$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4$ jedoch $\lambda \leq 1{,}4$

mit

$\lambda_1$ = Spannweitenbeiwert analog dem Wert bei Straßenbrücken, der zusätzlich noch den unterschiedlichen Schädigungseffekt verschiedener Eisenbahnverkehre berücksichtigt.

$\lambda_2$ = Verkehrsstärkebeiwert, der die pro Gleis und Jahr überführte Jahrestonnage berücksichtigt. Er ist bei dem "Normverkehr" von $25 \cdot 10^6$ t/Gleis·Jahr 1,0 und bei geringerem/höheren Verkehrsaufkommen niedriger/höher als 1,0.

$\lambda_3$ = Lebensdauerbeiwert, der wie bei den Straßenbrücken festgelegt ist.

$\lambda_4$ = Beiwert, der den positiven Effekt eines zweiten Gleises berücksichtigt. Bei Eisenbahnbrücken ist $\Delta\sigma_p$ unter Belastung zweier Gleise durch das LM 71 zu berechnen. Der Fall, dass sich zwei Züge auf der Brücke begegnen, ist aber relativ selten, so dass viele $\Delta\sigma$ aus der Überfahrt nur eines Zuges entstehen, die deutlich weniger Ermüdungsschaden hervorrufen.

Werden Bauteile sowohl global (glo) als auch lokal (loc) beansprucht, z.B. die Längsrippen einer Stahlfahrbahn, die Beanspruchungen als Gurt des Hauptträgers, aber auch aus Fahrbahnwirkungen erhalten, so sind die Einzelbeanspruchungen wie folgt zu kombinieren:

$$\Delta\sigma_{E.2} = \lambda_{loc} \cdot \Phi_{loc} \cdot \Delta\sigma_{loc} + \lambda_{glo} \cdot \Phi_{glo} \cdot \Delta\sigma_{glo}$$

Sind Bauteile nicht geschweißt oder geschweißt und spannungsfrei geglüht, so darf der im Druckbereich liegende Anteil von $\Delta\sigma$ auf 60% abgemindert werden, siehe Abb. 25.

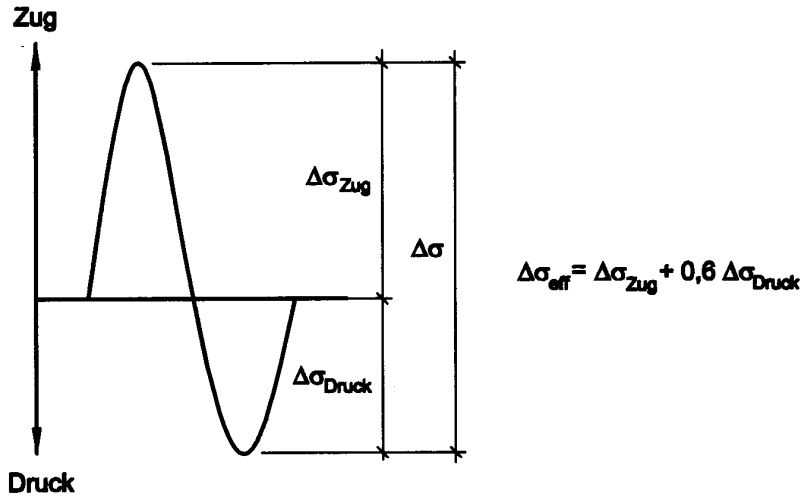



Abbildung 25: Zur effektiven Schwingbreite $\Delta\sigma_{eff}$

## 6.4 Ermüdungsnachweis

Im Regelfall ist nachzuweisen

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E.2} \leq \Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}$$

und analog

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E.2} \leq \Delta\tau_c / \gamma_{Mf}$$

Die Werte $\Delta\sigma_c$ und $\Delta\tau_c$ sind den Kurven analog Abb. 22 für $N = 2 \cdot 10^6$ zu entnehmen (Die Kerbfallbezeichnung, z.B. 80, entspricht dem $2 \cdot 10^6$-Wert $\Delta\sigma_c$ in N/mm²).

Außerdem ist zu setzen $\gamma_{Ff} = 1{,}0$ und $\gamma_{Mf}$ nach Tab. 15:

| $\gamma_{Mf}$ für | Straßenbrücken | Eisenbahnbrücken |
|---|---|---|
| Haupttragteile | 1,15 | 1,35 |
| Fahrbahn- und Nebentragteile | 1,00 | 1,15 |

Tabelle 15: Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{Mf}$

Alternativ darf der Ermüdungsnachweis auch durch eine Schadensberechnung auf der Grundlage der Hypothese von Palmgren-Miner erbracht werden. Dann ist nachzuweisen:

$$D_d = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq 1, \qquad \text{siehe Abb.26}$$

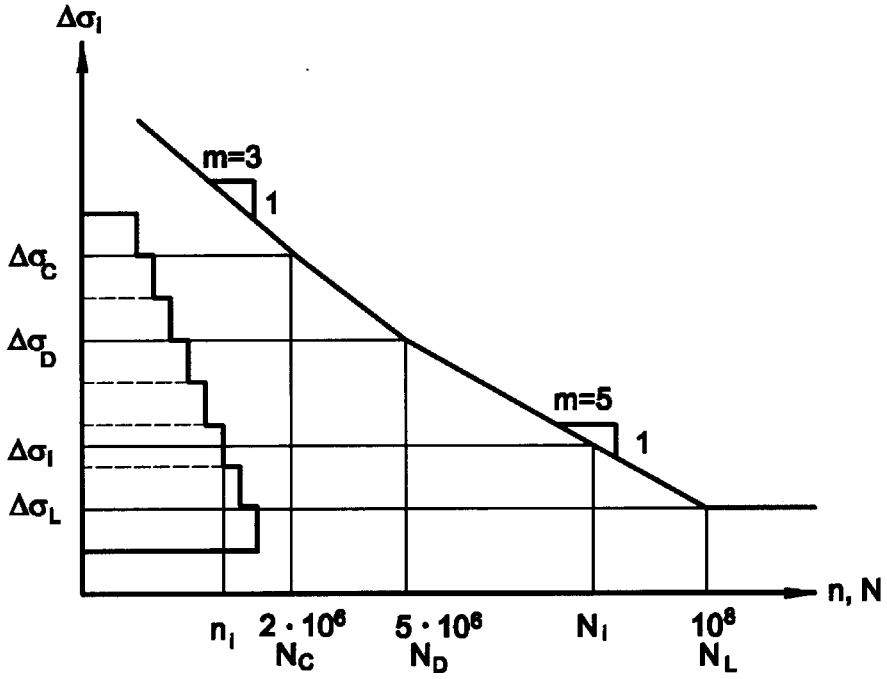



Abbildung 26: Bestimmung von $n_i$ und $N_i$

Nach Abb. 26 ist $n_i$ die Häufigkeit, mit der $\Delta\sigma_i$ in der Klasse i auftritt und $N_i$ die ertragbare Anzahl der Schwingbreite $\Delta\sigma_i$.

Allgemein gilt: $N_i = 5 \cdot 10^6 \cdot \left[ \frac{\Delta\sigma_D / \gamma_{Mf}}{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i} \right]^3$ bei $\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i \geq \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf}$

($\Delta\sigma_i$ liegt im Bereich der Wöhlerlinie mit m=3)

$N_i = 5 \cdot 10^6 \cdot \left[ \frac{\Delta\sigma_D / \gamma_{Mf}}{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i} \right]^5$ bei $\Delta\sigma_D / \gamma_{Mf} > \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i > \Delta\sigma_L / \gamma_{Mf}$

($\Delta\sigma_i$ liegt im Bereich der Wöhlerlinie mit m=5)

$N_i = \infty$ bei $\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i \leq \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf}$

($\Delta\sigma_i$ liegt unterhalb des Schwellenwertes und ruft keine Schädigung hervor)

# 7 Ergänzende Regelungen für den Stahlbrückenbau

## 7.1 Allgemeines

Die im folgenden bezüglich mitwirkender Breite und Plattenbeulen angegebenen Regelungen gelten für Querschnitte der Klassen 3 und 4. Sie dürfen auch auf Querschnitte der Klassen 1 und 2 angewandt werden, wobei die vorhandenen plastischen Reserven nicht genutzt werden.

Bei Anwendung ersetzen diese Regelungen die - teilweise mehr für den Hochbau zutreffenden - Nachweise des Kapitels 4 (Grenzzustände der Tragfähigkeit).

## 7.2 Querschnittsnachweise

Im GZT sind folgende Nachweise zu führen:

$$\eta_1 = \frac{\sigma_{x,Ed}}{f_{yd}} = \frac{N_{Sd}}{f_{yd} \cdot A_{eff}} + \frac{M_{Sd} + N_{Sd} \cdot e_N}{f_{yd} \cdot W_{eff}} \leq 1 \qquad \text{(Längsspannungen)}$$

$$\eta_2 = \frac{\sigma_{z,Ed}}{f_{ywd}} = \frac{F_{Sd}}{f_{ywd} \cdot L_{eff} \cdot t} \leq 1 \qquad \text{(Querdruck auf Steg)}$$

$$\eta_3 = \frac{\tau_{Ed}}{\chi_V \cdot f_{ywd} / \sqrt{3}} = \frac{V_{Sd}}{\chi_V \cdot (f_{ywd} / \sqrt{3}) \cdot b \cdot t} \leq 1 \qquad \text{(Schub)}$$

Zur Ermittlung der effektiven Querschnittswerte siehe 7.4.2, von $\chi_V$ siehe 7.4.3 und von $L_{eff}$ siehe 7.4.4. Bei Querschnitten der Klasse 3 sind $A_{eff}$ bzw. $W_{eff}$ durch A bzw. $W_{el}$ zu ersetzen. Die Zusatzhebelarme $e_N$ entstehen nur bei Klasse 4 durch die Schwerpunktverschiebung infolge örtlichen Beulens, siehe Abb. 27.

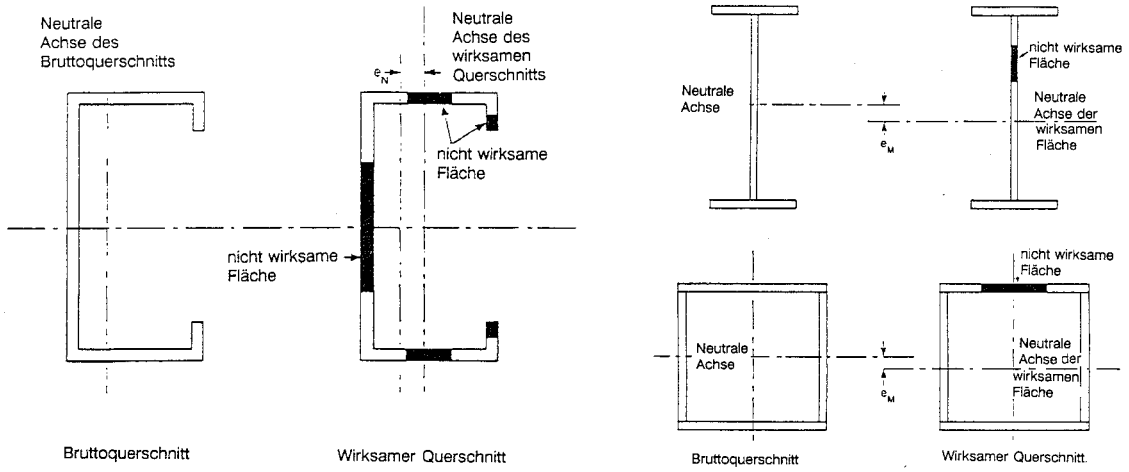



Abbildung 27 (2.1 und 2.2): Effektive Querschnitte bei Druck- (links) und Biegebeanspruchung (rechts)

**Interaktion:**

Während $\eta_1$ die N-M-Interaktion berücksichtigt und auch bei kleinen Querkräften ($\eta_3 \leq 0{,}5$) gilt, ist bei großen Querkräften ($\eta_3 > 0{,}5$) eine Abminderung erforderlich und der Nachweis für die **M-N-V-Interaktion** nach

$$\eta_1 + \left[1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right] \cdot (2 \cdot \eta_3 - 1)^2 \leq 1$$

zu führen.

Dieser Nachweis ist zusätzlich zu den o.g. Einzelnachweisen zu erbringen, wobei

$M_{f,Rd}$ = plastisches Bemessungsmoment des Querschnitts ohne Stege
$M_{pl,Rd}$ = plastisches Bemessungsmoment des Gesamtquerschnitts
$\eta_1$ mit Bruttoquerschnittswerten berechnet
$\eta_3$ mit $\chi_W$ statt $\chi_V$ berechnet wird, siehe 7.4.3

Bei **M-N-Querlast F-Interaktion** ist einzuhalten:

$$0{,}8 \cdot \eta_1 + \eta_2 \leq 1{,}4$$

## 7.3 Berücksichtigung von Schubverzerrungen

Bei breiten Gurten entziehen sich diejenigen Fasern, die einen großen Abstand von querkraftbeanspruchten Stegen haben, der vollen Mitwirkung. Dies gilt für Druck- und Zuggurte gleichermaßen. Durch Schubverzerrungen gilt dann nicht mehr die Bernoulli-Naviersche Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte.

Man kann dies berücksichtigen, indem man die geometrisch vorhandene Gurtbreite $b_0$ nach

$b_{eff} = \beta \cdot b_0$

auf eine mittragende Breite $b_{eff}$ abmindert. $b_0$ ist in Abb. 28 als Abstand von Gurtmitte bzw. Gurtrand vom querkraftbeanspruchten Steg definiert.

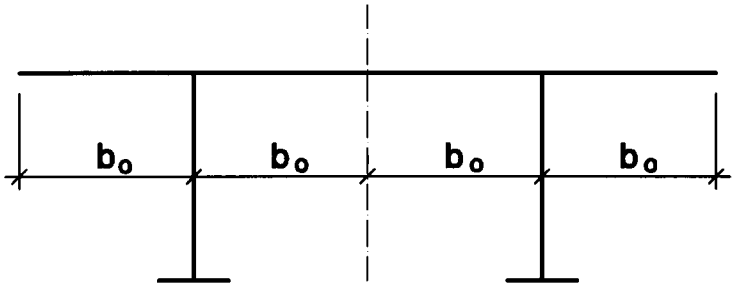



Abbildung 28: Definition von $b_0$

Ist der Gurt der Dicke t mit Steifen ausgesteift, so ist statt $b_0$ jetzt mit $\alpha_0 \cdot b_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{St}}{b_0 \cdot t}} \cdot b_0$ zu rechen, wobei $A_{St}$ die Gesamtsteifenfläche innerhalb der Breite $b_0$ ist.

Mit $L_e$ = Stützweite bei Einfeldträgern oder sonst nach Abb. 29 und $\kappa = \frac{\alpha_0 \cdot b_0}{L_e}$ können die β-Werte nach Tab. 16 berechnet werden.

| $\kappa = \frac{\alpha_0 \, b_0}{L_e}$ | Nachweisort | $\beta$ - Wert |
|---|---|---|
| ≤ 0,02 | | $\beta = 1{,}0$ |
| 0,02 - 0,70 | Feldmoment | $\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6{,}4\,\kappa^2}$ |
| | Stützmoment | $\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6{,}0\left(\kappa - \frac{1}{2500\,\kappa}\right) + 1{,}6\,\kappa^2}$ |
| > 0,70 | Feldmoment | $\beta = \beta_1 = \frac{1}{5{,}9\,\kappa}$ |
| | Stützmoment | $\beta = \beta_2 = \frac{1}{8{,}6\,\kappa}$ |
| alle $\kappa$ | Endauflager | $\beta_0 = (0{,}55 + 0{,}025 / \kappa)\,\beta_1$, jedoch $\beta_0 < \beta_1$ |
| alle $\kappa$ | Kragarm | $\beta = \beta_2$ am Auflager, $\beta_0 = 1{,}0$ am Ende |

Tabelle 16 (3.2): Faktor β für die mittragende Breite

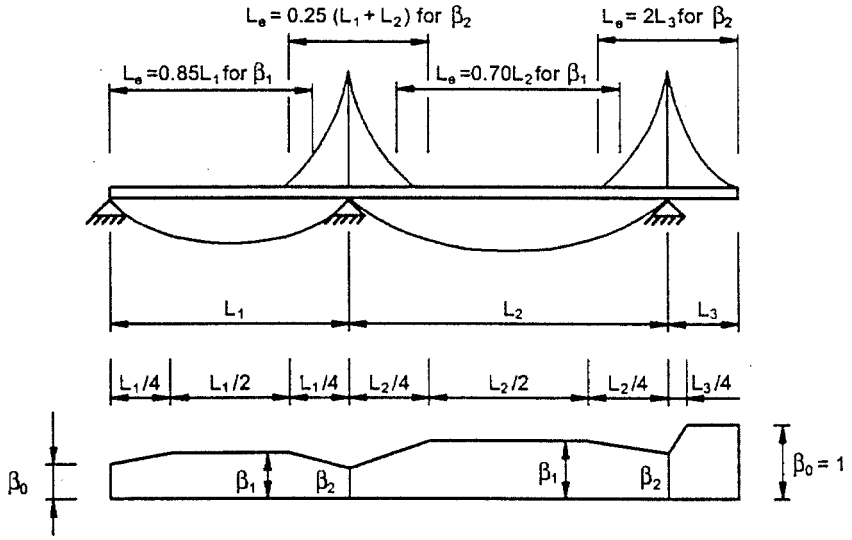



Abbildung 29 (3.1): Effektive Länge $L_e$ und Längsverlauf der mittragenden Breite

Diese Regelungen stimmen weitgehend mit der DS 804 überein. Sie gelten für elastisches Werkstoffverhalten ohne Beulerscheinungen. Treten in gedrückten Gurten der Querschnittsklasse 4 zusätzlich Beulerscheinungen auf, so ist statt der gedrückten Plattenfläche $A_c$ nur noch die effektive Fläche $A_{c,eff}$ (siehe 7.4.2) vorhanden.

Dann ist unter der kombinierten Wirkung von Schubverzerrung und Plattenbeulen

$A_{eff} = A_{c,eff} \cdot \beta^{\kappa}$ , jedoch $A_{eff} \geq \beta \cdot A_{c,eff}$

mit β nach Tabelle 16 und $\kappa = \dfrac{\alpha_0 \cdot b_0}{L_e}$

## 7.4 Plattenbeulen

### 7.4.1 *Übersicht*

Beulen ebener Bleche kann unter Längsdruck- , Schub- und/oder Querdruckspannungen auftreten.

### 7.4.2 *Beulen unter Längsspannungen*

Hier werden nur Regelungen für Querschnitte der Klasse 4 mitgeteilt, bei denen es allein unter Normalspannungen bereits zum Ausbeulen kommen kann. Das Beulen von Querschnitten der Klassen 3 und 4 unter kombinierter σ-τ-(Querdruck-) Beanspruchung ist nicht behandelt und sollte nach DIN 18800 Teil 3 nachgewiesen werden.

Bei Querschnitten der **Klasse 4 ohne Längssteifen** ist bei alleiniger Druckbeanspruchung der bezogene Beulschlankheitsgrad

$$\overline{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{f_y}{k_\sigma \cdot \sigma_E}} \ .$$

Wegen $\sigma_E = \dfrac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1-\nu^2) \cdot b_p^2} = 189800 \cdot \left(\dfrac{t}{b_p}\right)^2$ und $f_y = 235/\varepsilon^2$ ist auch

$$\overline{\lambda_p} = \frac{b_p / t}{28{,}4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}}$$

mit $b_p$ = Blechbreite
$t$ = Blechdicke
$k_\sigma$ = Beulwert

Dann gilt bei Zugrundelegung der Winterkurve, die auch in DIN 18800 T.3 für Beulen unter Längsspannungen verwendet wird, für

$$\overline{\lambda_p} > 0{,}673 \qquad \rho = (\overline{\lambda_p} - 0{,}22) / \overline{\lambda}_p^2 \qquad \text{und}$$
$$\overline{\lambda_p} \leq 0{,}673 \qquad \rho = 1$$

Mit dem Abminderungsfaktor ρ wird dann die gedrückte Blechfläche $A_c$ auf

$A_{c,eff} = \rho \cdot A_c$

reduziert. Der Beulnachweis der DIN 18800 T.3, bei der der Abminderungswert κ mit ρ identisch ist (Der Beulnachweis wird dort als Spannungsnachweis mit vollem Querschnitt gegen $\kappa \cdot f_{yd}$ geführt.), wird hier ersetzt durch einen Spannungsnachweis mit der reduzierten Blechfläche $\rho \cdot A_c$ gegen die volle Streckgrenze $f_{yd}$.

Die Verteilung von $A_{c,eff} = t \cdot b_{eff}$ über die Breite ist abhängig von den Lagerungsbedingungen und der Spannungsverteilung nach Tab.17 (4.1) und 18 (4.2) anzunehmen.

In den Querschnitten der **Klasse 4 mit Längssteifen** ist analog

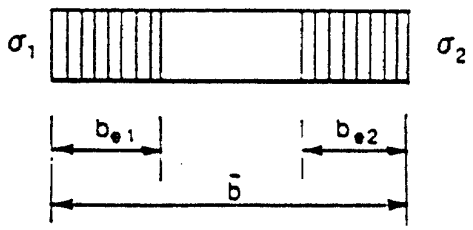
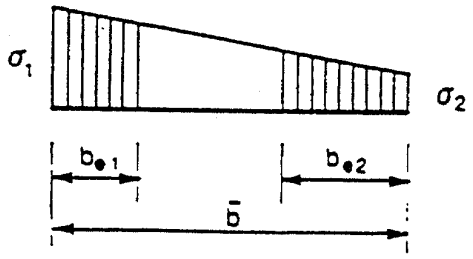
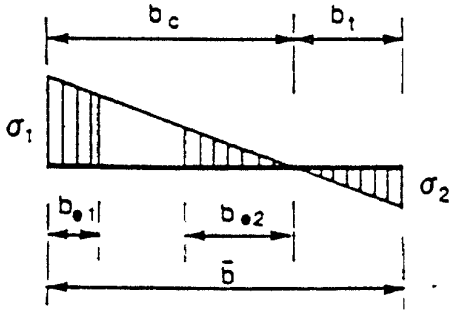
$$\overline{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_A \cdot f_y}{\sigma_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{\beta_A \cdot f_y}{k_{\sigma,p} \cdot \sigma_E}}$$

$k_{\sigma,p}$ = Beulwert der versteiften Platte mit verschmierten Steifen

$\beta_A = \frac{A_{eff}}{A}$ wobei A = Bruttoquerschnittsfläche der ausgesteiften Platte

$A_{eff}$ = effektive Fläche, wobei die Teilflächen der Einzelfelder i zwischen den Steifen mit $A_{c,eff\,i} = \rho_i \cdot A_{ci}$ (s.o.) angesetzt werden

Mit diesem $\overline{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_A \cdot f_y}{k_{\sigma,p} \cdot \sigma_E}}$ kann der Abminderungsfaktor ρ für die äquivalente Platte nach der Winterkurve (s.o.) berechnet werden.

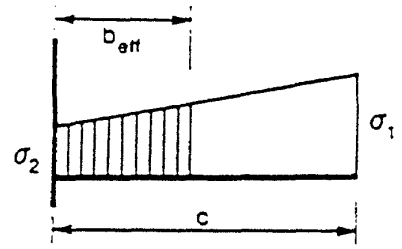
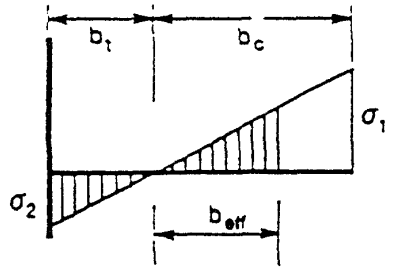
| Spannungsverteilung (Druck positiv) | wirksame Breite $b_{eff}$ |
|---|---|
|  | <u>$\psi = -1$:</u><br>$b_{eff} = \rho \bar{b}$<br>$b_{e1} = 0{,}5 b_{eff}$<br>$b_{e2} = 0{,}5 b_{eff}$ |
|  | <u>$1 > \psi \geq 0$:</u><br>$b_{eff} = \rho \bar{b}$<br>$b_{e1} = 2 b_{eff}/(5 - \psi)$<br>$b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$ |
|  | <u>$\psi < 0$:</u><br>$b_{eff} = \rho\, b_c = \rho \bar{b}/(1-\psi)$<br>$b_{e1} = 0{,}4 b_{eff}$<br>$b_{e2} = 0{,}6 b_{eff}$ |

| $\psi = \sigma_2/\sigma_1$ | 1 | $1 > \psi > 0$ | 0 | $0 > \psi > -1$ | -1 | $-1 > \psi > -2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Beulwert $k\sigma$ | 4,0 | $8{,}2 / (1{,}05 + \psi)$ | 7,81 | $7{,}81 - 6{,}29\psi + 9{,}78\psi^2$ | 23,9 | $5{,}98(1-\psi)^2$ |

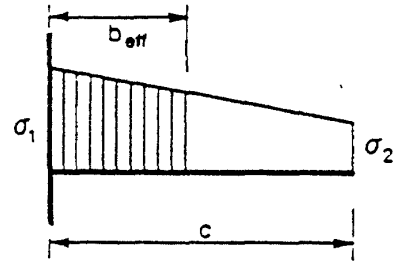
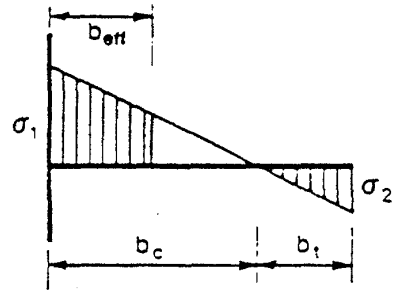
Alternativ für $1 \geq \psi \geq -1$:

$$k_\sigma = \frac{16}{[(1+\psi)^2 + 0{,}112(1-\psi)^2]^{0,5} + (1+\psi)}$$

Tabelle 17 (4.1): Verteilung von $b_{eff}$ bei beidseitiger Stützung

| Spannungsverteilung (Druck positiv) | Wirksame Breite $b_{eff}$ |
|---|---|
|  | $1 > \psi \geq 0$:<br>$b_{eff} = \rho\ c$ |
|  | $\psi < 0$:<br>$b_{eff} = \rho\ b_c = \rho\ c/(1 - \psi)$ |

| $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$ | 1 | 0 | -1 | $1 \geq \psi \geq -1$ |
|---|---|---|---|---|
| Beulwert $k_\sigma$ | 0,43 | 0,57 | 0,85 | $0{,}57 - 0{,}21\ \psi + 0{,}07\ \psi^2$ |

| | |
|---|---|
|  | $1 > \psi \geq 0$:<br>$b_{eff} = \rho\ c$ |
|  | $\psi < 0$:<br>$b_{eff} = \rho\ b_c = \rho\ c/(1 - \psi)$ |

| $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$ | 1 | $1 > \psi > 0$ | 0 | $0 > \psi > -1$ | -1 |
|---|---|---|---|---|---|
| Beulwert $k_\sigma$ | 0,43 | $0{,}578 / (\psi + 0{,}34)$ | 1,7 | $1{,}7 - 5\ \psi + 17{,}1\ \psi^2$ | 23,8 |

Tabelle 18 (4.2): Verteilung von $b_{eff}$ bei einseitiger Stützung

Um knickstabähnliches Verhalten zu berücksichtigen, wird außerdem die ideale Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ des von den Längsrändern gelösten versteiften Blechs berechnet. Es gilt

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{A \cdot a^2}$$

mit $I_x$ = Trägheitsmoment der versteiften Platte siehe Abb. 30
a = Stützweite der Platte in Längsrichtung (i.a. Querträgerabstand)

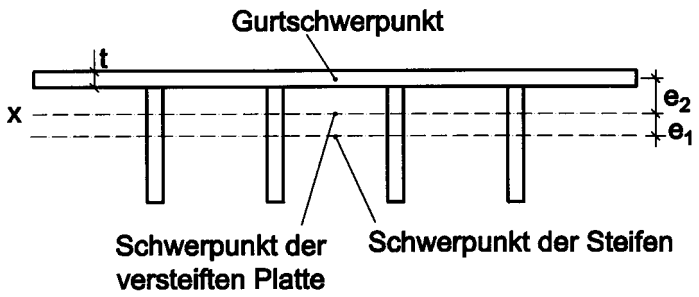



Abbildung 30 (4.1): Platte mit Längsrippen

Der zugehörige bezogene Schlankheitsgrad ist

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_A \cdot f_y}{\sigma_{cr,c}}}$$

Damit und mit dem Imperfektionsbeiwert $\alpha_e = \alpha_0 + \frac{0{,}09}{i/e}$ kann der Knickfaktor $\chi_c$ wie für einen mittig gedrückten Stab bestimmt werden, siehe 4.4.1.

Es ist zu setzen

$\alpha_0$ = 0,34 für geschlossene Steifen
$\alpha_0$ = 0,49 für offene Steifenquerschnitte
$i = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$
e = max $\{e_1 ; e_2\}$ , siehe Abb. 30

Damit ergibt sich der endgültige Abminderungsfaktor $\rho_c$ durch eine Interpolation für $\rho$ ohne knickstabähnliches Verhalten (Winterkurve) und $\chi_c$ für reines Knicken nach

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c$$

mit $\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1$ aber $0 \le \xi \le 1$

Die wirksame Querschnittsfläche der druckbeanspruchten Bereiche ist damit

$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_c$

Damit die Quersteifen die Längssteifen starr stützen können, sind Mindestträgheitsmomente abhängig von Stützweite b, Vorkrümmung der Platte und Längs-Druckkraft im Beulfeld vorgeschrieben. Dasselbe gilt für die Torsionssteifigkeit offener Längssteifen (Festlegungen identisch DIN 18800 T.3), damit diese nicht durch Biegedrillknicken versagen.

### 7.4.3 *Schubbeulen*

Bei unausgesteiften Stegen mit $b_w/t > 72 \cdot \varepsilon / \eta$ und ausgesteiften Stegen mit $b_w/t > 31 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau} / \eta$ muss der Nachweis gegen Schubbeulen erfolgen, und es sind Quersteifen an den Auflagern erforderlich ($b_w$ = Steghöhe; $\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$ ; $\eta$=1,32 bei S 235, S 275 und S 355; $\eta$=1,155 bei S 420 und S 460; $k_\tau$ = Schubbeulwert).

Der Bemessungswiderstand eines Steges gegen Schubbeulen ist

$$V_{c,Rd} = \chi_V \cdot f_{ywd} \cdot b \cdot t / \sqrt{3}$$

Der plastische Querschnittswiderstand nach 4.3.5 wird also mit

$\chi_v = \chi_w + \chi_f \le \eta$

abgemindert.

$\chi_w$ ist der Beitrag des Steges. Der Beitrag des Flansches $\chi_f$ darf nur bei Zwischenquersteifen berücksichtigt werden (überkritische Querkraft durch Ausbildung von Zugdiagonalen) und darf vernachlässigt werden.

Der Abminderungsfaktor $\chi_w$ ist nach Tab.19 abhängig von $\overline{\lambda_w}$ und der Ausbildung der Auflagerquersteifen zu berechnen (Abb.31).

| $\bar{\lambda}_w$ | schubstarre Endquersteife | schubweiche Endquersteife |
|---|---|---|
| $< 0{,}83/\eta$ | $\eta$ | $\eta$ |
| $0{,}83/\eta \leq \bar{\lambda}_w < 1{,}08$ | $0{,}83/\bar{\lambda}_w$ | $0{,}83/\bar{\lambda}_w$ |
| $\geq 1{,}08$ | $1{,}37/(0{,}7+\lambda_w)$ | $0{,}83/\lambda_w$ |
| für S235, S275 und S355<br>für S420 und S460 | $\eta = 1{,}20\ \gamma_{M1}/\gamma_{M0}$<br>$\eta = 1{,}05\ \gamma_{M1}/\gamma_{M0}$ | |

Tabelle 19 (4.3): Beitrag $\chi_w$ des Steges zum Schubbeulwiderstand

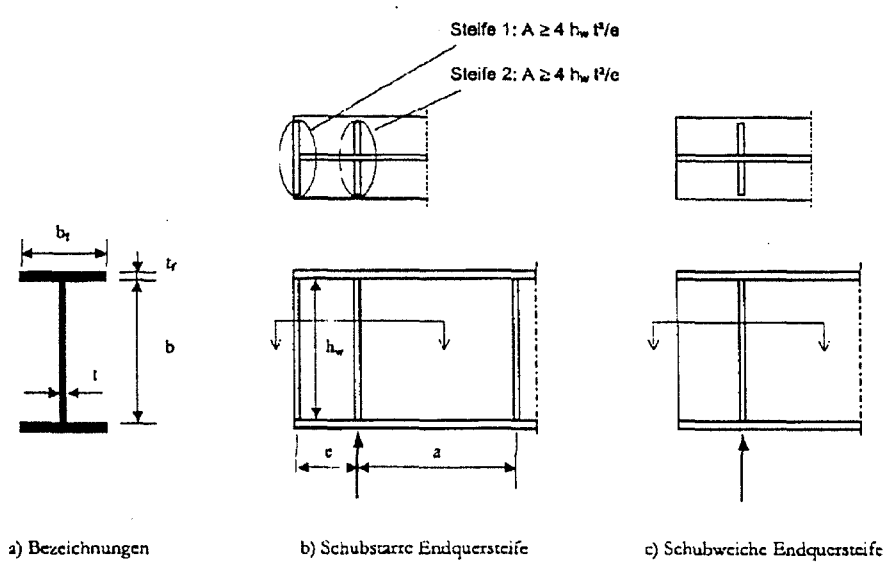



Abbildung 31 (4.4): Ausbildung der Endquersteifen

Die allgemeine Formel für $\overline{\lambda_w}$

$$\overline{\lambda_w} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\sqrt{3} \cdot \tau_{cr}}}$$

wird für Stege ohne Zwischensteifen

$$\overline{\lambda_w} = \frac{b_w}{86{,}4 \cdot t \cdot \varepsilon}$$

und für Stege mit Zwischensteifen

$$\overline{\lambda_w} = \frac{b_w}{37{,}4 \cdot t \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}}$$

### 7.4.4 *Widerstand von Stegen unter örtlichen Querlasten*

Statt der früheren drei getrennten Nachweise gegen Stegstauchen, - krüppeln und -beulen gibt es jetzt nur noch einen Nachweis.

Es werden die Lasteinleitungen nach Abb. 32

- Typ a) einseitig am Flansch, Stützung durch beiderseitige Querkräfte
- Typ b) beidseitig am Flansch
- Typ c) einseitig am Flansch in der Nähe eines nicht ausgesteiften Trägerendes

unterschieden.

$$k_F = 6 + 2\left[\frac{h_w}{a}\right]^2 \qquad k_F = 3{,}5 + 2\left[\frac{h_w}{a}\right]^2 \qquad k_F = 2 + 6\,\frac{s_s + c}{h_w} \le 6$$

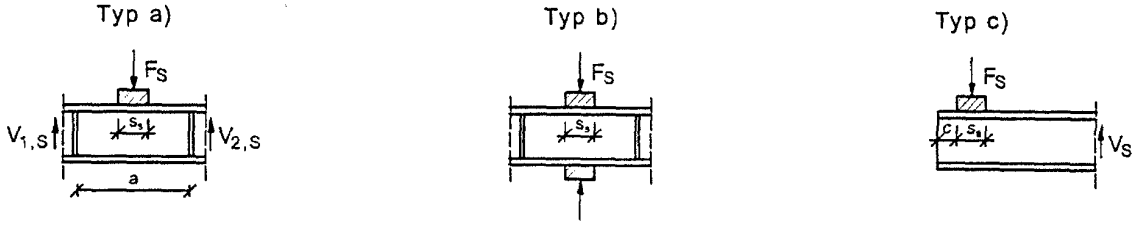



Abbildung 32 (4.7): Verschiedene Lasteinleitungen und zugehörige Beulwerte

Mit der Länge $s_s$ der starren Lasteinleitung nach Abb. 33

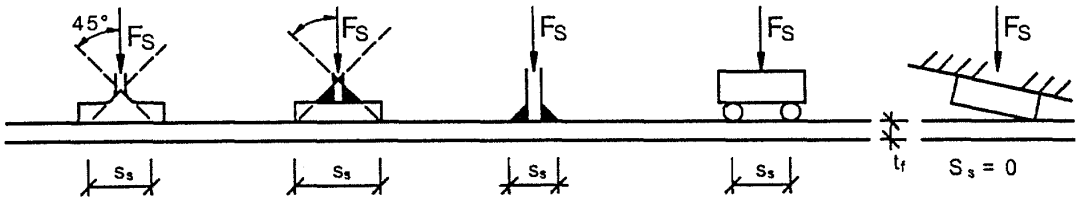



Abbildung 33 (4.8): Länge $s_s$ der starren Lasteinleitung

wird die wirksame Lasteinleitungslänge $l_y$ bei den Typen a) und b)

$$l_y = s_s + 2 \cdot t_f \cdot \left[1 + \sqrt{m_1 + m_2}\right]$$

mit $$m_1 = \frac{f_{yf} \cdot b_f}{f_{yw} \cdot t_w}$$

$$m_2 = 0{,}02 \cdot \left(\frac{h_w}{t_f}\right)^2 \quad \text{bei} \quad \overline{\lambda_F} > 0{,}5 \quad \text{sonst} \quad m_2 = 0$$

wobei gilt

$$\overline{\lambda_F} = \sqrt{\frac{l_y \cdot t_w \cdot f_{y,w}}{F_{cr}}}$$

mit $$F_{cr} = 0{,}9 \cdot k_F \cdot E \cdot \frac{t_w^3}{h_w}$$

Die Beulwerte $k_F$ sind in Abb. 32 zu entnehmen.

Dann gilt

$$\chi_F = \frac{0{,}5}{\overline{\lambda_F}} \leq 1$$

und für die effektive Länge $L_{eff}$

$$L_{eff} = \chi_F \cdot l_y$$

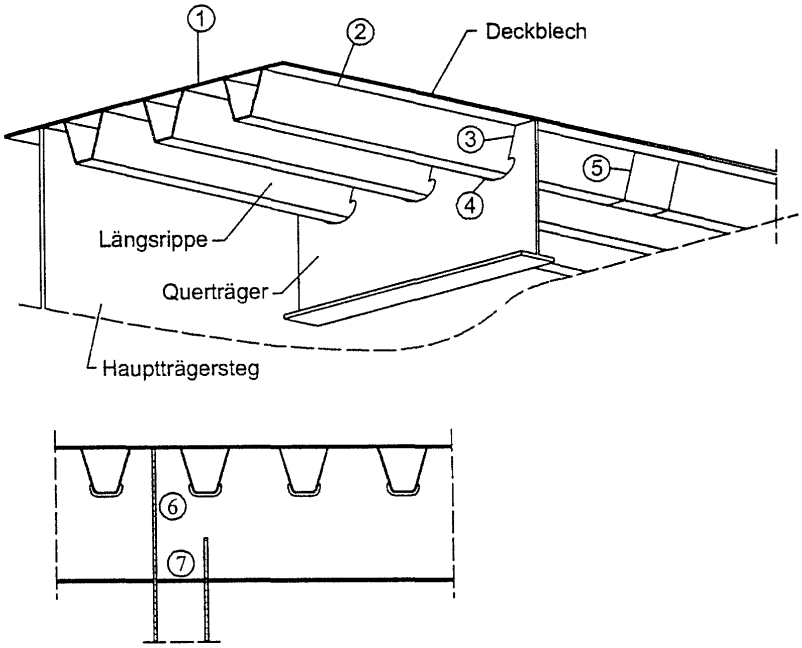
Mit $L_{eff}$ kann $\eta_2$ unter 7.2 nachgewiesen werden, für den Widerstand gilt

$$F_{w,Rd} = L_{eff} \cdot t_w \cdot f_{yw} / \gamma_{M1}$$

## 7.5 Orthotrope Platten

### 7.5.1 *Straßenbrücken*

Bei dem komplexen Beanspruchungszustand einer orthotropen Platte, siehe Abb. 34, mit ihren ermüdungskritischen Details




| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | Deckblech | 5 | Längsrippenstoß |
| 2 | Längsrippenanschluss | 6 | Querträgerstoß |
| 3 | Naht Längsrippe-Querträgersteg | 7 | Verbindung mit Querrahmen |
| 4 | Querträgersteg | | |

Abbildung 34 (4): Konstruktionsdetails orthotroper Platten

ist ein wirklichkeitsnaher Ermüdungsnachweis kaum möglich. Deshalb werden in [2] Kapitel IV-1, vor allem umfangreiche konstruktive Empfehlungen zur ermüdungsgerechten Ausbildung gegeben. Hiervon sollen nur einige genannt werden:

- Fahrbahnblechdicke t
  $t \geq 12$ mm bei $\geq 70$ mm Fahrbahnbelagdicke
  $t \geq 14$ mm bei $\geq 40$ mm Fahrbahnbelagdicke

- Längsrippenabstand e
  $e / t \leq 25$ und $e \leq 300$ mm

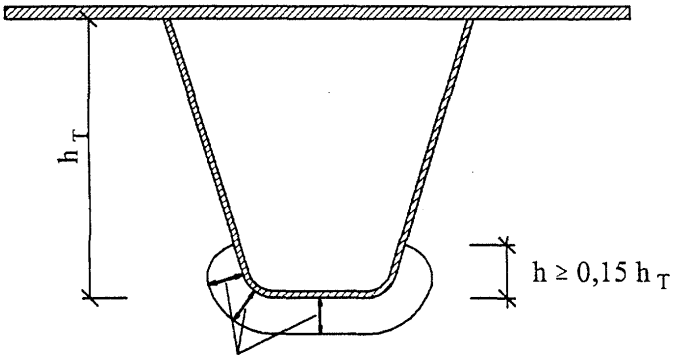
- Längsrippensteifigkeit nach 3.6, Abb. 2

- Längsrippen als Hohlprofil (i.a. Trapez- , aber auch V- oder Rundhohlprofile)

- Dicke a der Anschlussnaht am Fahrbahnblech $\geq$ Steifendicke t (möglichst stumpfnahtähnlich versenkt)

- Längsrippen durch Ausschnitte in Querträgerstegen durchführen

- Freischnitte nach Abb. 35 ausbilden




Freischnitthöhe b

| Stegblechdicke $t_{QSteg}$ | 10 ÷ 16 | 17 ÷ 20 | > 20 |
|---|---|---|---|
| Freischnitthöhe b | 25 | 40 | 50 |

Abbildung 35 (16): Freischnittgestaltung

### 7.5.2 *Eisenbahnbrücken*

Im Gegensatz zu Straßenbrücken ("Waschbretteffekt") dürfen bei Eisenbahnbrücken auch nur querausgesteifte Fahrbahnplatten verwendet werden.

Folgende Abmessungen nach Tab. 20 für längs und quer und nach Tab. 21 für nur quer ausgesteifte Fahrbahntafeln sind einzuhalten.

| | **Flachstahlsteifen** | **Trapezhohlsteifen** |
|---|---|---|
| Dicke $t_D$ des Deckblechs | $t_D \geq 14$ mm | $t_D \geq 14$ mm |
| Achsabstand $e_{LR}$ der Längsrippen | $e_{LR}$ = ca. 400 mm | 600 mm $\leq e_{LR} \leq$ 900 mm |
| Randabstand $e_{Rand}$ der ersten Längsrippe | $e_{Rand} \geq e_{LR}$ | $e_{Rand} \geq e_{LR}$ |
| Querträgerabstand $e_{QT}$ | $e_{QT} \leq$ 2 700 mm | 2 500 mm $\leq e_{QT} \leq$ 3 500 mm |
| Verhältnis $h_{LR}/h_{QT}$ der Höhe der Längsrippen zu der der Querträger | $h_{LR}/h_{QT} \leq 0{,}5$ | $h_{LR}/h_{QT} \leq 0{,}4$ |
| Blechdicke $t_{LR}$ der Längsrippen | $t_{LR} \geq 10$ mm | 6 mm $\leq t_{LR} \leq$ 10 mm |
| Stegdicke $t_{Steg\text{-}QT}$ der Querträger | $t_{Steg\text{-}QT} \geq 10$ mm | 16 mm $\leq t_{Steg\text{-}QT} \leq$ 20 mm |
| Gurtdicke $t_{Gurt\text{-}QT}$ der Querträger | $t_{Gurt\text{-}QT} > 10$ mm (falls Gurt vorhanden) | $t_{Gurt\text{-}QT} > 10$ mm |

Tabelle 20 (2.1): Abmessungen für orthotrope Fahrbahnplatten

| | |
|---|---|
| Dicke $t_D$ des Deckblechs | $t_D \geq 14$ mm |
| Randabstand $e_{Rand}$ | $e_{Rand} \geq 400$ mm |
| Achsabstand $e_{QT}$ der Querträger | $e_{QT}$ = ca. 700 mm |
| Stegdicke $t_{Steg\text{-}QT}$ der Querträger | $t_{Steg\text{-}QT} \geq 10$ mm |
| Gurtdicke $t_{Gurt\text{-}QT}$ der Querträger | $t_{Gurt\text{-}QT} \geq 10$ mm (falls Gurt vorhanden) |

Tabelle 21 (2.2): Abmessungen nur quer ausgesteifter Fahrbahntafeln

Weitere Empfehlungen sind

- Längsrippen sollen i.d.R. nur Flachstahl- oder/und Trapezhohlquerschnitte haben.
- Die Längsrippen sind ungestoßen durch die Querträgerstege zu führen, Konstruktionsdetails sind in [2] IV-2 angegeben
- Querträger sind bei großen Ausnehmungen für Trapezhohlsteifen als Vierendeelträger zu berechnen, siehe Abb. 36.

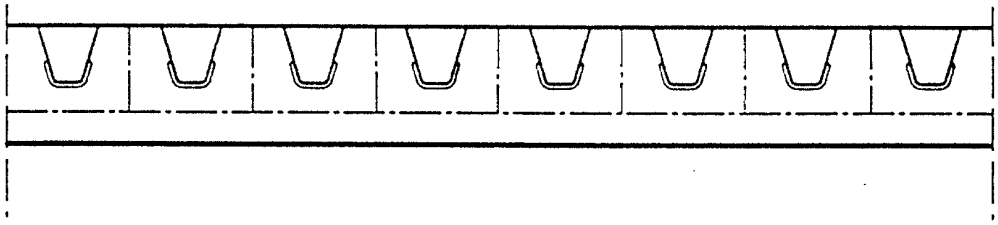


Abbildung 36 (2.4): Statisches Modell des Querträgers

- Besonderes Augenmerk ist dem Nachweis des Schnittes A-A in Abb. 37 zu widmen, sowohl statisch als auch auf Ermüdung

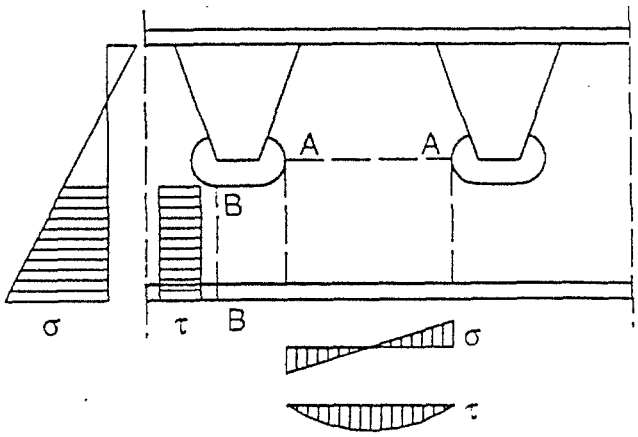



Abbildung 37 (2.5): Spannungsverteilung im Querträger

**Literatur:**

[1] DIN-Fachbericht 101 Einwirkungen auf Brücken, 2001

[2] DIN-Fachbericht 103 Bemessung von Stahlbrücken, 2001

[3] Graße, W.: Lasten und Einwirkungen auf Brücken einschließlich Kombinationsregeln (DIN-Fachbericht 101), Schulungsmaterial „Einführung der DIN-Fachberichte“, TU Dresden, Lehrstühle für Massivbau und für Stahlbau, 03/2002, Teil 2